

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y Modelos tecno-económicos de Interconexión de Internet

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: QUINTANA COSÍN, Juan

Tutor: ARACIL RICO, Javier
Departamento de Tecnología Electrónica y de las
Comunicaciones

FECHA: septiembre, 2020

ANÁLISIS Y MODELOS TECNO-ECONÓMICOS DE INTERCONEXIÓN DE INTERNET

AUTOR: Juan Quintana Cosín

TUTOR: Javier Aracil Rico

**Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
septiembre de 2020**

Resumen

Tradicionalmente la interconexión en Internet ha estado dominada por modelos de *peering* y tránsito, aunque hay pruebas cada vez más evidentes de que se trata de un marco de relaciones agotado y económicamente ineficiente, puesto que no es útil para asociar adecuadamente los costes reales con los actores implicados.

Ambos modelos han permitido el desarrollo de Internet de forma flexible y eficiente, sin necesidad de una regulación o de una planificación vertical (impuesta o acordada).

Todas las relaciones entre los diferentes actores (ISPs, proveedores de tránsito, etc.) están basadas en acuerdos independientes negociados libremente entre ellos. La elección en cada caso, en cada flujo de tráfico, de uno u otro modelo responde siempre a aspectos técnicos y, principalmente, económicos, aunque, evidentemente, las condiciones legales y regulatorias también tienen su impacto.

Junto a los beneficios que, claramente, estos modelos han proporcionado, la situación actual no está exenta de conflictos entre los diferentes actores del mundo Internet, más cuando la aparición de algunos nuevos está acentuando los desequilibrios que, en algunos casos, ya podían identificarse previamente.

Fundamentalmente, los conflictos derivan de la pretensión razonable de los proveedores de redes de compensar los costes asociados a sus despliegues, al tiempo que minimizar estos y los derivados del uso de redes de terceros para terminar su tráfico generado o recibido.

Los conflictos no se limitan solamente a la puesta a disposición sin coste de la propia red (*peering*) para terminar el tráfico de terceros, también aparecen, en un marco donde las relaciones son de igual a igual y gratuitas, cuando se despliegan rutas que, por sus condiciones geográficas, suponen altos costes de dudoso retorno. Conflictos como este, que impactan en la rentabilidad de las inversiones acometidas, son uno de los obstáculos para el acceso a Internet de algunas poblaciones remotas o dispersas en condiciones equivalentes al resto.

En el ecosistema actual, estos conflictos se vienen solucionando con negociaciones individuales dentro de los modelos de interconexión existentes y de algunas variantes de los mismos (*peering* pagado, por ejemplo). Estas negociaciones muchas veces son arduas, de larga duración y afectan a la calidad del servicio ofrecido a los clientes finales. Además, no proporcionan una solución definitiva a unos problemas que se pueden ir acrecentando con el tiempo, según se profundiza en la diversificación de servicios dentro del mundo Internet.

Por esta razón, se hace necesario el estudio, análisis y desarrollo de nuevos modelos tecno-económicos de interconexión que faciliten relaciones más eficientes, en las que todos los actores involucrados obtengan una solución satisfactoria a sus pretensiones, evitando que los conflictos perjudiquen la evolución ágil de Internet y la calidad en la prestación de los servicios.

Este Trabajo Fin de Master tiene como objetivo contribuir a este análisis, profundizando en un modelo que permita una mejor asociación de los costes incurridos con el reparto de las externalidades afloradas en la interconexión. Se aplicará Teoría de Juegos y, en concreto, los principios de Negociación de Nash para juegos cooperativos, para proponer un modelo *win-win* para quienes se interconectan.

Abstract

Traditionally, Internet interconnection has been dominated by peering and transit models, although there is increasing evidence that this is an exhausted and economically inefficient relationship framework, since it is not useful to adequately associate real costs with the actors involved.

Both models have allowed the development of the Internet in a flexible and efficient way, without the need for regulation or vertical planning (imposed or agreed).

All relations between the different actors (ISPs, transit providers, etc.) are based on independent agreements freely negotiated between them. The choice in each case, in each traffic flow, of one or the other model always responds to technical and, mainly, economic aspects, although, obviously, the legal and regulatory conditions affect it.

Along with the benefits that these models have clearly provided, the current situation is not without conflicts between the different actors in the Internet world, especially when the appearance of some new ones is accentuating the imbalances that, in some cases, could already be identified previously.

Fundamentally, conflicts stem from the reasonable claim of network providers to offset the costs associated to their deployments, while minimizing these and those derived from the use of third-party networks to terminate their generated or received traffic.

Conflicts are not limited only to the free provision of the network itself (peering) to end third-party traffic, they also appear, in a framework where relations are equal to equal and free, when routes are deployed that, due to their geographical conditions, they entail high costs of doubtful return. Conflicts such as this, which impact the profitability of the investments made, are one of the obstacles to Internet access of some remote or dispersed populations under conditions equivalent to the rest.

In the current ecosystem, these conflicts are being solved with individual negotiations within the existing interconnection models and some variants of them (paid peering, for example). These negotiations are often arduous, long-lasting, and affect the quality of service offered to end customers. Furthermore, they do not provide a definitive solution to problems that may increase over time, as the diversification of services within the Internet world deepens.

For this reason, it is necessary to study, analyze and develop new interconnection techno-economic models that facilitate more efficient relationships, in which all the actors involved obtain a satisfactory solution to their claims, avoiding conflicts that harm the agile evolution of Internet and the quality in the provision of services.

The objective of this Master's Thesis is to contribute to this analysis, deepening into a model that allows a better association of the costs incurred with the distribution of the externalities that emerge in the interconnection. Game Theory and, specifically, the Bargaining Nash principles for cooperative games, will be applied to propose a win-win model for those who interconnect.

Palabras clave

Interconexión, *Peering*, Tránsito, redes de telecomunicaciones, Teoría de Juegos, Negociación de Nash, Nash-Peering

Keywords

Interconnection, *Peering*, Transit, telecommunication networks, Game Theory, Nash's Bargaining, Nash-Peering

Agradecimientos

No tendría espacio suficiente para dar las gracias a todos aquellos que me han prestado apoyo a lo largo de los cuatro años del Grado y de los dos años del Máster, en los buenos y en los malos momentos, que de todo ha habido. Gracias a todos.

En especial, quiero dar las gracias a mis compañeros más cercanos en este Máster: Luis, Álex, Paula, Juan, Adrián y Alfonso. Todos nos hemos apoyado mutuamente y juntos hemos disfrutado de muy buenos momentos. Seguiremos siendo amigos y estos serán de los mejores recuerdos de nuestras carreras.

También dar las gracias a mi madre, a mi novia y, en especial, a mi padre, que me han ayudado en todo lo que estaba en sus manos desde hace muchos años.

Finalmente, quiero hacer mención a quienes me habéis soportado en este Trabajo de Fin de Máster, el último empujón para acabar una larga carrera universitaria, que solamente es el principio de lo que espero sea una actividad profesional muy satisfactoria. A Jesús Folgueira, que me orientó y apoyó para abordar un proyecto de vanguardia con aplicación a la realidad del negocio actual de las telecomunicaciones y de las redes que lo soportan. Y a Javier Aracil, a quien “asalté” para que fuese mi tutor y que me dirigió sabiamente para conseguir que el trabajo fuese un éxito. Muchas Gracias a los dos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	4
2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 INTERCONEXIÓN DE REDES IP	5
2.1.1 <i>Sistemas Autónomos (AS) y sus relaciones de interconexión</i>	8
2.1.2 <i>Protocolos de encaminamiento en Internet</i>	10
2.1.3 <i>BGP (Border Gateway Protocol)</i>	11
2.1.4 <i>Algunos aspectos económicos de los modelos de interconexión en Internet</i>	13
2.2 TEORÍA MATEMÁTICA DE JUEGOS	17
2.2.1 <i>Elementos del juego</i>	17
2.2.2 <i>Representaciones formales del juego</i>	18
2.2.2.1 Representación extensiva	18
2.2.2.2 Representación estratégica.....	21
2.2.3 <i>Tipos de juegos</i>	22
2.2.4 <i>Soluciones de un juego</i>	23
2.2.4.1 Soluciones mediante dominación	23
2.2.4.2 Soluciones mediante equilibrio: Equilibrio de Nash	24
2.2.5 <i>Juegos cooperativos</i>	24
3 EL MODELO DE INTERCONEXIÓN NASH-PEERING	27
3.1 LA SOLUCIÓN DE NASH AL PROBLEMA DE LA NEGOCIACIÓN	27
3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE INTERCONEXIÓN NASH-PEERING	29
3.3 MODELO DE COSTES PARA LA INTERCONEXIÓN	36
3.3.1 <i>Costes fijos</i>	38
3.3.2 <i>Costes variables</i>	40
4 APLICACIÓN DEL MODELO NASH-PEERING.....	42
4.1 DATOS ECONÓMICOS PARA APLICACIÓN DEL MODELO.....	42
4.2 CASOS DE USO	48
4.2.1 <i>Interconexión entre dos redes regionales similares en tecnología, arquitectura y tamaño</i>	48
4.2.1.1 Descripción del caso de uso	48
4.2.1.2 Aplicación del modelo	49
4.2.1.3 Análisis de resultados.....	51
4.2.1.4 Impacto económico de los resultados.....	53
4.2.2 <i>Interconexión internacional de un operador nacional convergente</i>	55
4.2.2.1 Descripción del caso de uso	55
4.2.2.2 Aplicación del modelo	56
4.2.2.3 Análisis de resultados	59
4.2.2.4 Impacto económico de los resultados.....	62
4.2.3 <i>Interconexión internacional de un operador móvil nacional</i>	65
4.2.3.1 Descripción del caso de uso	65
4.2.3.2 Aplicación del modelo	66
4.2.3.3 Análisis de resultados.....	67
4.2.3.4 Impacto económico de los resultados.....	69
4.2.4 <i>Interconexión de una CDN internacional con un operador nacional</i>	71
4.2.4.1 Descripción del caso de uso	71
4.2.4.2 Aplicación del modelo	72
4.2.4.3 Análisis de resultados.....	74
4.2.4.4 Impacto económico de los resultados.....	76
5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	78
5.1 CONCLUSIONES.....	78

5.2 TRABAJO FUTURO	79
REFERENCIAS	81
GLOSARIO	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: MODELO IDEAL DE INTERNET	5
FIGURA 2-2: MODELO REAL DE INTERNET: CONFEDERACIÓN DE REDES.....	6
FIGURA 2-3: CLASIFICACIÓN DE LOS ISPs EN NIVELES (<i>Tiers</i>).....	8
FIGURA 2-4: ASs Y PROTOCOLO BGP	12
FIGURA 2-5: ESTABLECIMIENTO DE SESIÓN BGP: FLUJO DE MENSAJES	13
FIGURA 2-6: GRÁFICA PARA DETERMINAR EL PERCENTIL 95 EN LA MEDIDA DEL ANCHO DE BANDA	14
FIGURA 2-7: PREVISIONES DE CRECIMIENTO DEL TRÁFICO IP MUNDIAL 2017-2022.....	15
FIGURA 2-8: EVOLUCIÓN DE LOS PRECIOS DEL TRÁNSITO IP EN EE.UU.	15
FIGURA 2-9: COMPARATIVA DE COSTES <i>PEERING</i> VS. TRÁNSITO	16
FIGURA 2-10: EJEMPLO GRÁFICO DE REPRESENTACIÓN EXTENSIVA	18
FIGURA 2-11: EJEMPLO GRÁFICO DE REPRESENTACIÓN ESTRATÉGICA.....	21
FIGURA 3-1: NASH-PEERING: FUNCIÓN DE PAGOS	30
FIGURA 3-2: FLUJOS DE TRÁFICO EN TRÁNSITO E INTERCONEXIÓN DIRECTA (<i>PEERING</i>)	31
FIGURA 3-3: NASH-PEERING: SENSIBILIDAD A COSTES DEL MODELO	32
FIGURA 3-4: NASH-PEERING: RELACIÓN ENTRE PAGO (p) Y EXCEDENTE (Δ).....	34
FIGURA 3-5: MODELO DE RED CON INTERCONEXIÓN DIRECTA (<i>PEERING</i>)	36
FIGURA 3-6: MODELO DE RED CON INTERCONEXIÓN MEDIANTE TRÁNSITO	37
FIGURA 4-1: SERVICIO EXTREMO A EXTREMO DE LÍNEAS ALQUILADAS.....	44
FIGURA 4-2: CASO DE USO 4.2.1: INTERCONEXIÓN ENTRE DOS REDES REGIONALES SIMILARES EN TECNOLOGÍA, ARQUITECTURA Y TAMAÑO	48
FIGURA 4-3: CASO DE USO 4.2.1: SENSIBILIDAD A LOS COSTES PARA OBTENER EXCEDENTE (Δ) POSITIVO	52
FIGURA 4-4: CASO DE USO 4.2.1: RESULTADO DE APLICACIÓN DE NASH-PEERING	52
FIGURA 4-5: CASO DE USO 4.2.2: INTERCONEXIÓN INTERNACIONAL DE UN OPERADOR NACIONAL CONVERGENTE	55
FIGURA 4-6: CASO DE USO 4.2.2: SENSIBILIDAD A LOS COSTES PARA OBTENER EXCEDENTE (Δ) POSITIVO	60
FIGURA 4-7: CASO DE USO 4.2.2: RESULTADO DE APLICACIÓN DE NASH-PEERING	61
FIGURA 4-8: CASO DE USO 4.2.3: INTERCONEXIÓN INTERNACIONAL DE UN OPERADOR MÓVIL NACIONAL	65
FIGURA 4-9: CASO DE USO 4.2.3: SENSIBILIDAD A LOS COSTES PARA OBTENER EXCEDENTE (Δ) POSITIVO	68
FIGURA 4-10: CASO DE USO 4.2.3: RESULTADO DE APLICACIÓN DE NASH-PEERING	68
FIGURA 4-11: CASO DE USO 4.2.4: INTERCONEXIÓN DE UNA CDN INTERNACIONAL CON UN OPERADOR NACIONAL	71
FIGURA 4-12: CASO DE USO 4.2.4: SENSIBILIDAD A LOS COSTES PARA OBTENER EXCEDENTE (Δ) POSITIVO	75
FIGURA 4-13: CASO DE USO 4.2.4: RESULTADO DE APLICACIÓN DE NASH-PEERING	76

1 Introducción

1.1 Motivación

Internet, tal y como lo conocemos a día de hoy, se originó en los años 60 [4]. La primera estructura fue desarrollada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, más concretamente por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (ARPA). Su objetivo inicial era experimentar con la conexión de redes de ordenadores localizados en diferentes puntos del país. Así surgió, a finales del año 1969, una red experimental que conectaba 4 nodos a través de una red de circuitos con un ancho de banda de 56 Kbps. A esta red, posteriormente, se fueron conectando hosts privados de universidades e instituciones gubernamentales, dando lugar a lo que se denominó ARPANET (*Advanced Research Projects Agency Network*), que abarcaba redes de investigación, gubernamentales y académicas, junto con un núcleo. Fueron los inicios de Internet.

A partir de esos principios simples y de objetivos muy concretos, la historia de Internet está caracterizada por el crecimiento, la diversificación y el incremento paulatino de la complejidad, cada vez mayores y más acelerados.

En 1985 el uso masivo de ARPANET y la congestión de sus enlaces dejaban claro que habían aparecido los primeros problemas de escalabilidad y que no serían los últimos. Esto condujo a la *National Science Foundation* (NSF) a comenzar el desarrollo de NSFNET. Una red más compleja pero aún con arquitectura jerárquica, formada por diferentes redes a nivel regional y otras conformadas por pares, conectadas al núcleo principal de NSFNET. ARPANET fue dada de baja en 1989.

A lo largo de los años, las diferentes organizaciones pidieron la interconexión entre sí, dando lugar a crecientes intereses comerciales sobre el acceso a NSFNET y las subredes existentes. Este hecho y la aparición de Proveedores de Servicios de Internet (ISPs), continuaron aumentando el tamaño y la complejidad de las conexiones, la conectividad y las infraestructuras, lo que llevó a la NSF a poner en manos de Sprint la gestión de la Red y de la conectividad entre redes de Europa, Asia y Estados Unidos. En 1995 NSFNET también sería dada de baja.

La infraestructura de Internet actual ha sido resultado de la transición desde una red troncal a una descentralizada, en Modelo de Confederación, operada por muchos proveedores comerciales. Funciona conectando dichos proveedores a través de puntos de conexión (*Points of Presence*, PoP) y de interconexiones directas entre las redes. El intercambio de información en los puntos de interconexión está basado en un protocolo de interconexión, BGP (*Border Gateway Protocol*), capaz de permitir la escalabilidad que la Red demanda y de ser eficiente en el entorno de complejidad creciente que la caracteriza. La “nueva” arquitectura, incluso, permite a los clientes de los proveedores ofrecer ellos mismos servicios, lo que nos da indicios de las mucho menores restricciones de la Red actual frente a las originarias, que estaban gestionadas por una única organización administrativa.

Los proveedores de Internet, en general, no tienen un objetivo altruista: son empresas que buscan la viabilidad y rentabilidad de sus negocios de acceso. Con ellos empezaron a aparecer problemas en la inicial cooperación entre pares, en la que se sustentaba la idea de Internet: los pares son a la vez competidores y no necesariamente sus intereses económicos son coincidentes.

La creciente complejidad (y coste) de las infraestructuras, la renovación tecnológica, el mantenimiento de los elementos que hacen posibles las comunicaciones... junto con las cada vez, también, más complejas relaciones entre pares, hacen necesaria una Ingeniería que, como siempre, no solo persiga la viabilidad técnica de unas redes en constante crecimiento, sino también su viabilidad económica y la de los negocios que soportan.

En el marco de ese objetivo, este Trabajo aborda una visión alternativa para algunos aspectos económicos de las soluciones técnicas a los problemas de interconexión entre los diferentes actores que han surgido (y siguen surgiendo) en torno a Internet.

En la actualidad las relaciones tecno-económicas de interconexión de Internet se estructuran en torno a dos modelos dominantes:

- **Tránsito:** los operadores utilizan redes de terceros (redes de tránsito) para intercambiarse tráfico. De esta forma, los clientes de un ISP tienen acceso a la totalidad de Internet sin necesidad de que su red esté físicamente conectada con todas las redes del mundo (innumerables), gracias a que las redes de tránsito intermedian en el encaminamiento del tráfico. Es un modelo de pago.
- **Peering:** los operadores interconectan sus redes directamente entre sí, intercambiando el tráfico originado por sus propios clientes y finalizado en los de su par y viceversa. Habitualmente, se sustenta en acuerdos libres de pago entre los pares (*settlement free peering*, *sf-peering*). Es un mecanismo encaminado a minimizar costes cuando las relaciones de tráfico entre los operadores alcanzan volúmenes importantes.

Ambos modelos han permitido el desarrollo de Internet de forma flexible y eficiente, sin necesidad de una regulación o de una planificación vertical (impuesta o acordada). Las relaciones entre los diferentes actores (ISPs, proveedores de tránsito, etc.) están basadas en acuerdos independientes negociados libremente entre ellos. La elección en cada caso, en cada flujo de tráfico, de uno u otro modelo responde siempre a aspectos técnicos y, principalmente, económicos, aunque, evidentemente, también influyen las condiciones legales y regulatorias.

Junto a los beneficios que claramente estos modelos han proporcionado, la situación actual no está exenta de disputas entre los diferentes actores del mundo Internet, especialmente entre aquellos que tienen establecidos o quieren establecer acuerdos de *peering*.

Dada la gratuidad del *peering* y que es una interconexión que se realiza para beneficio mutuo, ninguna de las dos partes de la interconexión debe tomar una ventaja injusta de los acuerdos establecidos. Cuando no es así, aparecen conflictos de intereses entre las partes, que pueden llevar a rupturas de los acuerdos de *peering* (*de-peering*) y dejar desconectados a los usuarios finales.

Las tipologías de estas disputas, conflictos con *de-peering* asociado, es variada. A modo de ejemplo, sin pretensión de ser exhaustivos, algunas de ellas son las siguientes [15]:

- **Desequilibrio en los intercambios de tráfico**

En el *peering*, al ser gratuita la terminación en la red propia del tráfico que se genera en la red de la otra parte interconectada, los volúmenes de tráfico intercambiados entre ambas deben estar razonablemente equilibrados. La base del acuerdo estriba en que los costes en que incurre cada parte por la terminación del tráfico generado por la otra parte sean aproximadamente los mismos.

Se suelen fijar límites de desbalance, de forma que, una vez superados a favor de una de las redes interconectadas, se considera que está aprovechándose injustamente del acuerdo establecido puesto que no comparte todos los costes de terminación de su tráfico.

- **Desacuerdos en torno al punto de interconexión**

Se produce en aquellos puntos de públicos, donde se interconectan más de dos ISPs. Suelen ser puntos que exigen de todos ellos compromisos firmes en cuanto a la evolución y crecimiento de los equipamientos “comunes” (*routers* y *switches*) y los enlaces establecidos con ellos.

Cuando el tráfico intercambiado crece y uno de los ISPs no realiza a tiempo el crecimiento de sus recursos asociados, perjudica a los demás porque se ven afectadas los caudales intercambiados con él.

- **Actitud dictatorial**

También son disputas basadas en desequilibrio de tráfico, pero en estos casos la parte más grande se apalanca en su base de clientes (directa o indirecta) para beneficiarse injustamente del acuerdo de *peering*, intentando imponer unas condiciones desequilibradas.

Se plantea, por ejemplo, cuando una de las partes, sin compartir los costes inducidos, termina grandes volúmenes de tráfico procedentes de un tercero, proveedor de contenidos, en la red de la otra parte, la cual, de alguna manera, se ve forzada a aceptar el desbalance por el interés que esos contenidos despiertan en sus clientes de acceso, que a su vez lo son del servicio que presta el tercero en cuestión.

La creciente demanda de transmisión de vídeo y su concentración en unos pocos proveedores y CDN (*Content Delivery Networks*, Redes de Distribución de Contenidos) ha incrementado el número e importancia de estas disputas. Es una nueva situación que empuja a revisar las estrategias de interconexión y el impacto que las disputas pueden tener en la percepción de los usuarios finales, más con una tipología de contenido, el vídeo, tan sensible a la calidad del medio de transmisión.

En el ecosistema actual, las disputas se vienen solucionando con negociaciones individuales dentro de los modelos de interconexión existentes y de algunas variantes de los mismos (*peering* pagado, por ejemplo). Estas negociaciones muchas veces son arduas, de larga duración y afectan a la calidad del servicio proporcionado a los clientes finales. Además, no proporcionan una solución definitiva a unos problemas que se pueden ir acrecentando con el tiempo, según se profundiza en la diversificación de servicios dentro del mundo Internet.

Por esta razón, se hace necesario el estudio, análisis y desarrollo de nuevos modelos tecnológicos de interconexión que faciliten relaciones más eficientes, en las que todos los actores involucrados obtengan una solución satisfactoria a sus pretensiones, evitando que los conflictos perjudiquen la evolución ágil de Internet y la calidad en la prestación de los servicios.

1.2 Objetivos

Las soluciones técnicas de interconexión son estables y la mayoría de las disputas identificadas tienen un origen económico. Con seguridad, cualquiera de ellas podría solucionarse haciendo crecer las redes o redireccionando el tráfico hacia rutas de mayor capacidad, que finalmente también habrá que hacer crecer.

El problema que subyace es quién paga el crecimiento de las redes y cómo se reparten los costes y beneficios derivados de la interconexión. Los modelos actuales no dan una solución satisfactoria al reparto por su escasa relación con esos costes y beneficios.

Los enfoques de los diferentes estudios y propuestas para abordar los nuevos modelos de interconexión son variados y en muchos casos complejos de aplicar. Un ejemplo lo vemos en aquellos que plantean compartir los ingresos en función del valor de los contenidos transportados, la publicidad, la lealtad de los clientes finales, etc. [17].

Este Trabajo Fin de Máster plantea la aplicación de la Teoría de Juegos como herramienta para superar las disputas en la negociación del *peering*, tomando en cuenta exclusivamente los costes y beneficios directamente relacionados con la interconexión, que son fácilmente evaluables y contrastables por las partes que intervienen en el proceso.

En concreto, en este Trabajo se utilizará un modelo de interconexión basado en los principios de Negociación de Nash (*Nash Bargaining model*), que ha sido propuesto recientemente por distintos autores en la literatura de investigación [12]. Este modelo presenta ventajas frente a otros por su sencillez y aplicabilidad. Además, facilita una distribución equitativa de los beneficios asociada al reconocimiento de los costes reales imputados a cada uno de los participantes en la negociación, lo que, al mismo tiempo, potencia la mejora de la eficiencia y la rentabilidad de las inversiones en nuevos despliegues y coberturas.

El objetivo último del Trabajo es obtener conclusiones sobre las ventajas potenciales del método propuesto para la optimización global de la interconexión en Internet, maximizando el beneficio para todos los actores implicados e identificando en qué condiciones de contorno se producen.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Este primero recoge cuál es la motivación y objetivos del Trabajo Fin de Máster.
- En el capítulo 2 se muestra la arquitectura de las redes de interconexión de Internet en la actualidad junto con los modelos económicos que las soportan. También se describen aquellos aspectos de la Teoría Matemática de Juegos que nos ayudarán en el análisis del nuevo modelo de interconexión.
- El capítulo 3 aborda el modelo de interconexión denominado Nash-Peering, profundizando en el reparto de costes y beneficios de la interconexión entre las partes que se interconectan. Incorpora un modelo para el análisis de costes de la interconexión, para su aplicación en el modelo Nash-Peering.
- En el capítulo 4 se realiza la aplicación del modelo estudiado a casos de uso contruidos a partir de situaciones que se producen en redes reales, analizando los resultados y valorando las condiciones de entorno que harían recomendable su aplicación.
- Finalmente, el capítulo 5 muestra las conclusiones del Trabajo y una propuesta de futuras líneas de evolución.

2 Estado del arte

Este apartado pretende aportar un acercamiento a los dos campos en torno a los que gira este Trabajo Fin de Master.

En primer lugar, describe brevemente la arquitectura de Internet, los elementos que componen la Red, las relaciones de interconexión entre ellos, el encaminamiento del tráfico y los protocolos que lo soportan. Finaliza con una visión sobre aspectos económicos de la interconexión entre redes, importantes para entender el desarrollo posterior de esta memoria.

La segunda parte pone foco en algunos aspectos generales de la Teoría Matemática de Juegos: los elementos del juego, las representaciones, los tipos de juegos y sus soluciones, para acabar con un breve acercamiento a los juegos cooperativos, a los que se aplica la Negociación de Nash, objetivo de este Trabajo.

2.1 Interconexión de Redes IP

Una visión idealizada y extendida del funcionamiento de Internet supone la existencia de una conexión directa entre los *hosts* finales y los *routers* en la red, conectados entre sí formando una red conexas y compacta, en la que se coopera entre “*peers*” (pares) mediante protocolos de encaminamiento, intercambiando información sobre los caminos para llegar a cualquier lugar de la red de la manera más eficiente, con la finalidad de conseguir una conectividad global.

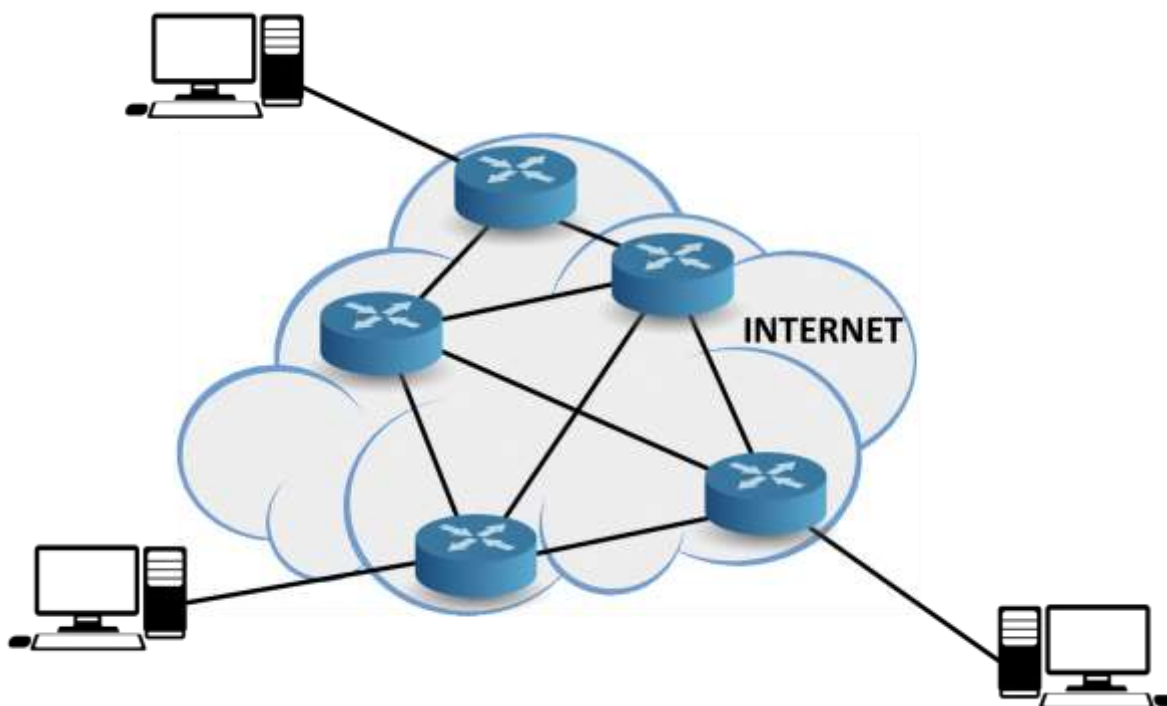


Figura 2-1: Modelo ideal de Internet

Aunque a modo de divulgación puede ser válido, el modelo no responde a la realidad.

El servicio de Internet está proporcionado por un gran número de redes, propiedad de empresas, ISP (*Internet Service Providers*), que compiten para aumentar sus beneficios económicos. Es un modelo de Confederación de Redes, donde todos se relacionan con todos,

y que suele entrar en conflicto con la cooperación altruista teórica que se supone para conseguir una conectividad global [1].

Es cierto que, como se muestra en la Figura 2-1, los ISP colaboran entre sí aplicando una serie de políticas de interconexión, que se desarrollarán en detalle más adelante, aunque siempre manteniendo sus intereses como empresas.

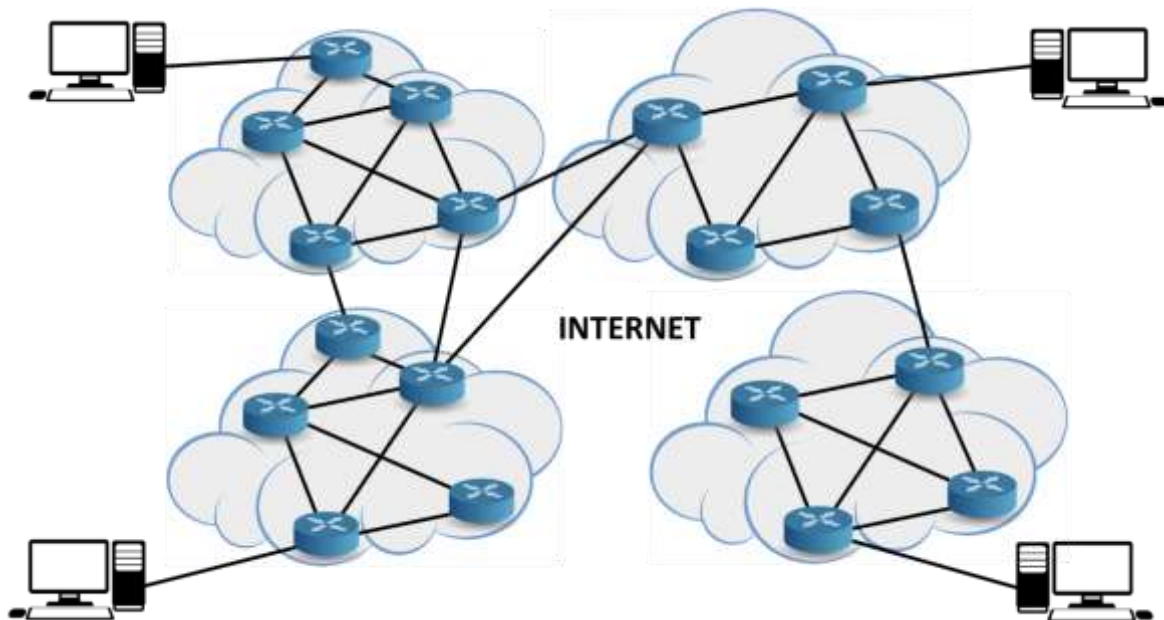


Figura 2-2: Modelo real de Internet: Confederación de Redes

En este entorno descentralizado y no jerárquico, cuando dos usuarios quieren comunicarse entre sí o cuando un usuario accede a un servidor de contenidos, las diferentes redes deben colaborar encaminando el tráfico IP para hacer llegar la información de un extremo a otro de Internet.

De la misma forma, internamente a cada red tampoco existe un procedimiento jerárquico que indique a los nodos (*routers*) cómo deben encaminar hacia su destino el tráfico que reciben, sino que el modelo de colaboración se extiende a todos los *routers* que la componen.

Existe, por tanto, un plano de control, que se apoya en los protocolos de encaminamiento, y un plano de datos, que conmuta y transmite los paquetes.

Para realizar el encaminamiento en Internet se implementa un doble mecanismo, extremadamente sencillo y muy escalable. Por un lado, el mantenimiento en cada router de tablas de información que permiten dirigir el tráfico en una dirección u otra, y por otro el establecimiento de protocolos que permiten el intercambio de información para que cada *router*, de forma autónoma, pueda llevar a cabo la porción de encaminamiento que le corresponde.

Así, en cada *router* existen tablas de encaminamiento compuestas por 4 elementos: red de destino, ruta a seguir (próximo salto), interfaz de salida y máscara (para saber si el destino está en la misma subred que el *router* o debe encaminarse el tráfico hacia una subred externa). Solo con estos cuatro datos se pueden encaminar todos los paquetes IP a cualquier lugar de la red.

Los protocolos de encaminamiento van a diferenciarse en función de su uso interno, dentro de una misma red, o para encaminar entre redes distintas. En la práctica se usa un único protocolo para encaminamiento en este segundo caso: BGP (*Border Gateway Protocol*), que también tiene una aplicación específica para el encaminamiento interno (*internal BGP*, iBP). Básicamente, BGP permite el establecimiento de sesiones entre nodos vecinos, en el contexto de las cuales se intercambian la información precisa para el encaminamiento a cualquier punto de la red, manteniéndola permanentemente actualizada.

Los protocolos de encaminamiento IP se pueden clasificar en:

- Estáticos: las tablas de encaminamiento están gestionadas manualmente.
De mantenimiento tedioso, pero muy útil cuando las rutas no cambian con frecuencia porque se mejora la eficiencia del ancho de banda en envíos entre *routers*.
- Dinámicos: los propios *routers* son quienes actualizan sus tablas de encaminamiento a partir de la información intercambiada con otros *routers* vecinos mediante los protocolos de encaminamiento.

Los cambios en la topología o la carga de tráfico de la red son otros de los motivos por los que las tablas se actualizan.

El método es útil en redes con muchos cambios, pero impacta en el ancho de banda consumido para el intercambio de mensajes entre *routers* que permitan la actualización de las tablas.

A efectos de encaminamiento (y no solamente), todos los ISP no son exactamente iguales. Existe una división en niveles, “*tiers*”:

1. **Tier 1**: solamente unos pocos; tienen un alcance global, en el sentido de que sus tablas de encaminamiento tienen rutas a todos los prefijos de Internet existentes
2. **Tier 2**: generalmente tienen alcance regional o estatal
3. **Tier 3**: aquellos que tienen un pequeño número de clientes finales, habitualmente localizados geográficamente.

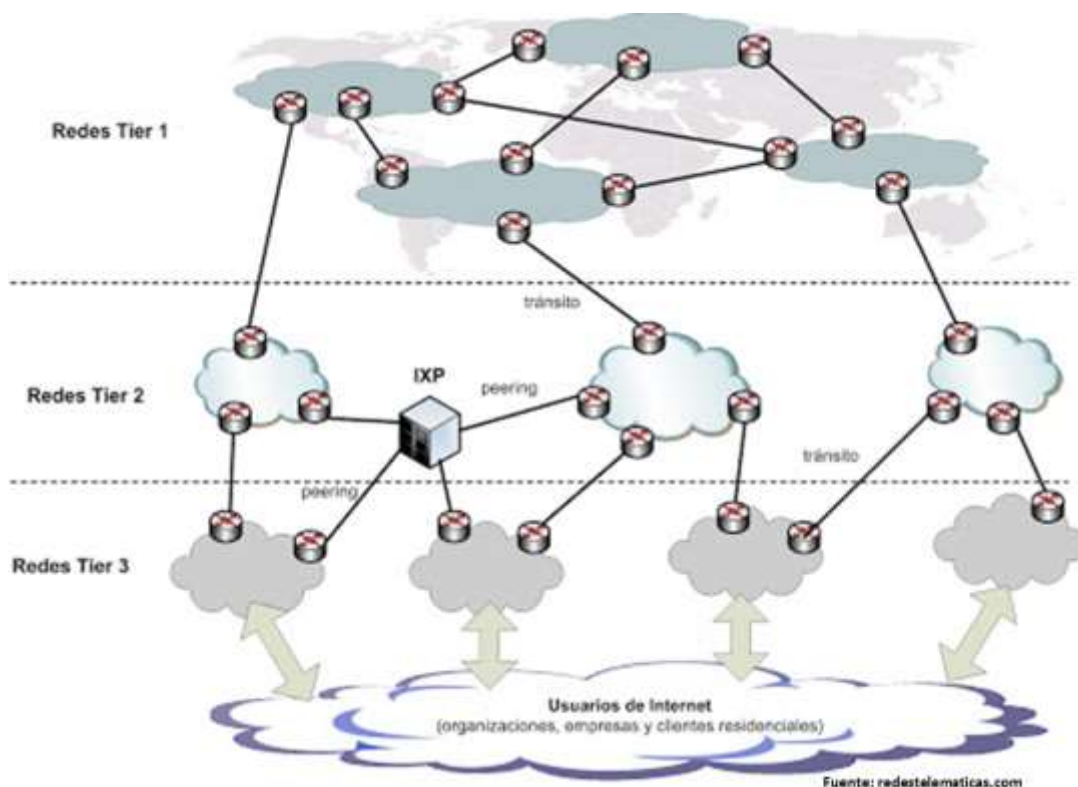


Figura 2-3: Clasificación de los ISPs en niveles (*Tiers*)

2.1.1 Sistemas Autónomos (AS) y sus relaciones de interconexión

El elemento nuclear de la arquitectura de Internet son los Sistemas Autónomos (AS, *Autonomous System*). Entendemos como tales a grupos de redes IP que poseen un conjunto de políticas de rutas propio e independiente, de forma que es capaz de realizar una gestión autónoma del tráfico entre él y el resto de ASs que existen en Internet.

Un AS es propiedad de una sola entidad comercial o administrativa, que lo gestiona.

Cada AS se identifica mediante un número único de 16 bits denominado ASN (*Autonomous System Number*).

Debido a que existen diferentes tipos de ASs, se establecen diferentes relaciones técnico-comerciales entre ellos en torno a la interconexión. Se pueden dividir en 2 grandes grupos:

- **Tránsito:** un ISP proveedor proporciona acceso a todos los ASs conectados con él y cuyos destinos se encuentran en sus tablas de encaminamiento.

El proveedor cobra a sus clientes por el acceso a Internet, a cambio de reenviar los paquetes IP, en su nombre, a los destinos que desean.

- **Peering:** dos ASs (normalmente ISPs) se brindan acceso mutuo a un subconjunto de las tablas de encaminamiento que cada uno mantiene. Además de la gestión del tráfico de la propia red, hay un interés en prestar servicio a los propios clientes de tránsito (de cada AS).

El *peering* es un acuerdo comercial, pero no necesariamente implica un acuerdo económico con intercambio de flujos monetarios, de hecho, lo más habitual es el *peering* gratuito o *settlement-free peering* (*sf-peering*). Suele darse siempre que se cumplan unas determinadas condiciones de equilibrio, donde el balance de tráfico entre los ASs

implicados no sea excesivamente asimétrico (por ejemplo, hasta una relación 3:1 o incluso 4:1).

También hay alternativas de pago, *paid peering*, en las que uno de los ASs paga al otro en función un determinado acuerdo. No hay estándares en cuanto a las normas que rigen estos acuerdos y pueden definirse en función del volumen de tráfico enviado en un sentido o del mayor uso del enlace por una de las partes implicadas.

El *peering* suele llevarse a cabo entre entidades competidoras a nivel comercial. Los principales intereses por los que se firman estos acuerdos son dos:

- Conseguir alcanzar a los clientes de tránsito que tiene el otro AS sin tener que mantener una relación permanente y directa con ellos.
- Evitar pagar los costes de tránsito a sus respectivos proveedores.

Se implementa estableciendo un enlace libre de tránsito entre ellos para reenviar paquetes a sus propios clientes. Además, de una ventaja económica, supone una ventaja estratégica a nivel de red, ya que una ruta directa normalmente mejora el rendimiento extremo a extremo (latencia, jitter...) para los clientes.

Para cualquier AS que quiera mantener una relación con otro, ya sea de *peering* o de tránsito, es primordial conocer el alcance que tiene el AS con quien se va a interconectar.

Por tanto, se plantean dos cuestiones críticas para todo AS:

- cómo conocer el alcance que tienen las tablas de encaminamiento de los demás ASs de la Red y
- qué cantidad de información ha de exportar a sus pares, proveedores y clientes de tránsito.

Se gestionan con dos procedimientos: la exportación y la importación de rutas.

Modular estos intercambios de información se enfocan con 3 estrategias diferentes desde el punto de vista de la exportación de rutas:

- Rutas de los clientes de tránsito: son, con toda seguridad, las más importantes para un AS. Brindan una visión hacia el exterior sobre cuál es el propio alcance y asegura que todos los potenciales remitentes en la Red pueden comunicarse con ellos.

Los ISPs intentarán anunciar tantas rutas de sus clientes de tránsito como sea posible a tantos ASs conectados como sea posible. A mayor cantidad de tráfico enviado por otros ISPs a nuestros clientes, mayores ingresos recibidos.

Por tanto, si un destino es anunciado por varios “vecinos”, un ISP debe de dar prioridad al anuncio hecho por un cliente sobre los hechos por los pares o por sus propios proveedores de tránsito.

- Rutas entre pares: uno de los objetivos de la exportación de rutas es extraer el máximo beneficio económico posible. Por eso, un ISP está interesado en anunciar estas rutas a sus propios clientes de tránsito, para conseguir que estos encaminen tráfico a través de nuestra red hacia los destinos deseados.
- Rutas de los proveedores de tránsito: un ISP no tiene incentivos para anunciar el alcance que tiene su proveedor de tránsito a los ASs con los que mantiene una relación de *peering*, ya que, por lo general, no obtiene ningún pago de estos. En cambio, sí que está interesado en anunciarlo a sus propios clientes de tránsito para conseguir que encaminen tráfico a través de su red hacia los destinos deseados.

Desde la perspectiva de la importación de rutas, para añadirlas a las tablas de reenvío propias, el enfoque es diferente. Hay que identificar la ruta más beneficiosa para un AS y para ello hay que conocer quién anunció cada ruta.

- Las rutas se importan con el siguiente orden de prioridad:
cliente > par (*peer*) > proveedor
- Las rutas anunciadas por los clientes de tránsito siempre tienen prioridad sobre las rutas de la misma red anunciadas por proveedores o pares, para asegurar que los paquetes destinados al cliente no atraviesen ASs adicionales de forma innecesaria.
- Las rutas que son proporcionadas por los pares tienen preferencia frente a las de los proveedores de tránsito ya que uno de los objetivos del *peering* es intercambiar información de accesibilidad sobre los clientes de tránsito mutuos, desintermediando a terceros.

Además, este hecho puede contribuir a una menor utilización del enlace con el proveedor de tránsito, lo que reducirá el coste del acuerdo con él.

2.1.2 Protocolos de encaminamiento en Internet

En Internet, para la comunicación interna y externa a los ASs, incluido el fundamental intercambio de información sobre encaminamiento, se utilizan dos tipos de protocolos:

- **IGP (Interior Gateway Protocol)**: protocolos de encaminamiento interno dentro de cada AS. Son los responsables de construir y mantener la información de encaminamiento dentro del dominio del AS.

Sus características principales son la robustez, la eficiencia y la seguridad.

Existen 2 tipos de protocolos IGP:

- ***Distance-Vector***: protocolos que tienen en cuenta la cantidad de saltos que se han de dar al tomar la decisión del camino que debe atravesar un flujo para llegar a destino, sin tener en cuenta las características de estos saltos.
- ***Link-State***: protocolos que tienen en cuenta parámetros de enlace al tomar las decisiones de encaminamiento, como el ancho de banda de los enlaces que se atraviesan en el trayecto hasta el destino.

Son los protocolos más populares y más eficientes.

Los protocolos IGP más utilizados en la Red actualmente son: RIP (*Routing Information Protocol*), de tipo *distance-vector*, y OSPF (*Open Shortest Path First*) e IS-IS (*Intermediate System to intermediate System*), de tipo *link-state*.

- **EGP (Exterior Gateway Protocol)**: en la práctica se usa un único protocolo de este tipo, BGP (*Border Gateway Protocol*). Es el protocolo de encaminamiento de datos sobre redes IP entre ASs, de gran capacidad para escalar con el creciente número de rutas intercambiadas en la interconexión. Soporta la transferencia entre los *routers* de borde o frontera, situados en los límites entre las redes de los ISPs, de información de encaminamiento sobre prefijos de direcciones IP accesibles.

Es de tipo “*path-vector*”: utiliza vectores de ASNs para mantener la información del *path* (camino) actualizada dinámicamente. Al mantener un vector con todos los ASN

de los ASs por los que ha pasado el tráfico e indicar el trazado (saltos entre ASs) que han seguido los paquetes dentro de la Red, evita los bucles de encaminamiento.

La diferencia principal entre los protocolos IGP y los EGP reside en que los segundos están orientados a proporcionar información de accesibilidad y facilitar la implementación de la política de encaminamiento entre ASs diferentes de manera escalable, mientras que los primeros se ocupan de optimizar una métrica de ruta (“*path-metric*”) de manera interna en un AS.

2.1.3 BGP (*Border Gateway Protocol*)

Una vez conocidos los acuerdos de interconexión entre ASs y la forma en que estos se intercambian información de accesibilidad, vamos a profundizar un poco en el protocolo usado para estos intercambios de información, BGP.

Los objetivos con los que se creó BGP fueron tres:

- Escalabilidad: garantizar que la infraestructura de encaminamiento de Internet pudiera crecer indefinidamente a medida que aumentaba el número de redes conectadas¹.
- Establecimiento de políticas: capacidad para que cada AS, de forma independiente, implementara e hiciera cumplir sus propias políticas de encaminamiento.

Se definieron atributos de BGP para anunciar rutas y permitir el filtrado de las mismas, además de obtener una trazabilidad de la ruta seguida por un paquete a lo largo de una conexión.

- Cooperación entre ASs: al no estar Internet a cargo de una sola entidad administrativa, el protocolo de encaminamiento debía permitir que cada AS tomara decisiones puramente locales sobre cómo encaminar paquetes, pero también les obligaba a cooperar con su competencia, mediante *peering* y tránsito, para conseguir que todos los ASs de Internet tuvieran un alcance global.

¹El número de rutas IPv4 BGP en Internet era de 814.000 en enero de 2020, habiéndose incrementado en más del 50% en los últimos 5 años. Se prevé que en enero de 2021 se alcancen las 862.000 rutas [32].

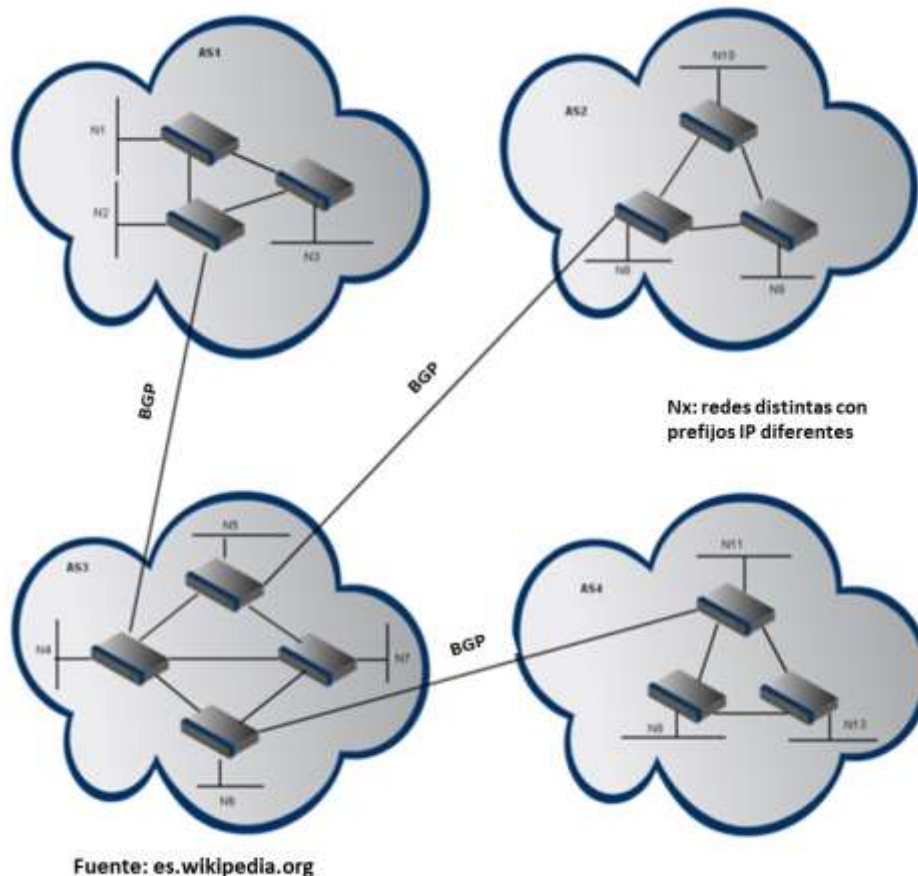


Figura 2-4: ASs y protocolo BGP

BGP se implementa sobre TCP (*Transmission Control Protocol*), en el puerto 179, lo cual le permite una entrega segura y ordenada de los paquetes enviados.

Una vez se ha establecido una conexión TCP en el puerto BGP, el inicio de una sesión BGP entre ASs comienza cuando uno de ellos envía un mensaje OPEN. A continuación, los ASs intercambian sus tablas con todas las rutas activas, aplicando las reglas de exportación de rutas vista anteriormente.

Las rutas intervinientes en la sesión no necesitan ser anunciadas periódicamente, solo se hará en el caso en que estas cambien.

En una sesión BGP ya iniciada existen dos tipos de mensaje: UPDATE y KEEPALIVE.

- UPDATE: su función es actualizar el estado de la ruta a lo largo de una sesión. Existen dos tipos: “*Announcements*” (cambios en rutas nuevas o existentes) y “*Withdrawals*” (informan de que determinadas rutas ya no existen).
- KEEPALIVE: BGP mantiene un temporizador para envío de mensajes, transcurrido el cual, si no se ha enviado un mensaje UPDATE, se envía un mensaje KEEPALIVE. Este mensaje es fundamental en BGP, ya que, al funcionar sobre TCP, no tiene un mecanismo de control de “sesiones activas”. La ausencia prolongada de mensajes KEEPALIVE en una sesión BGP provoca su terminación.

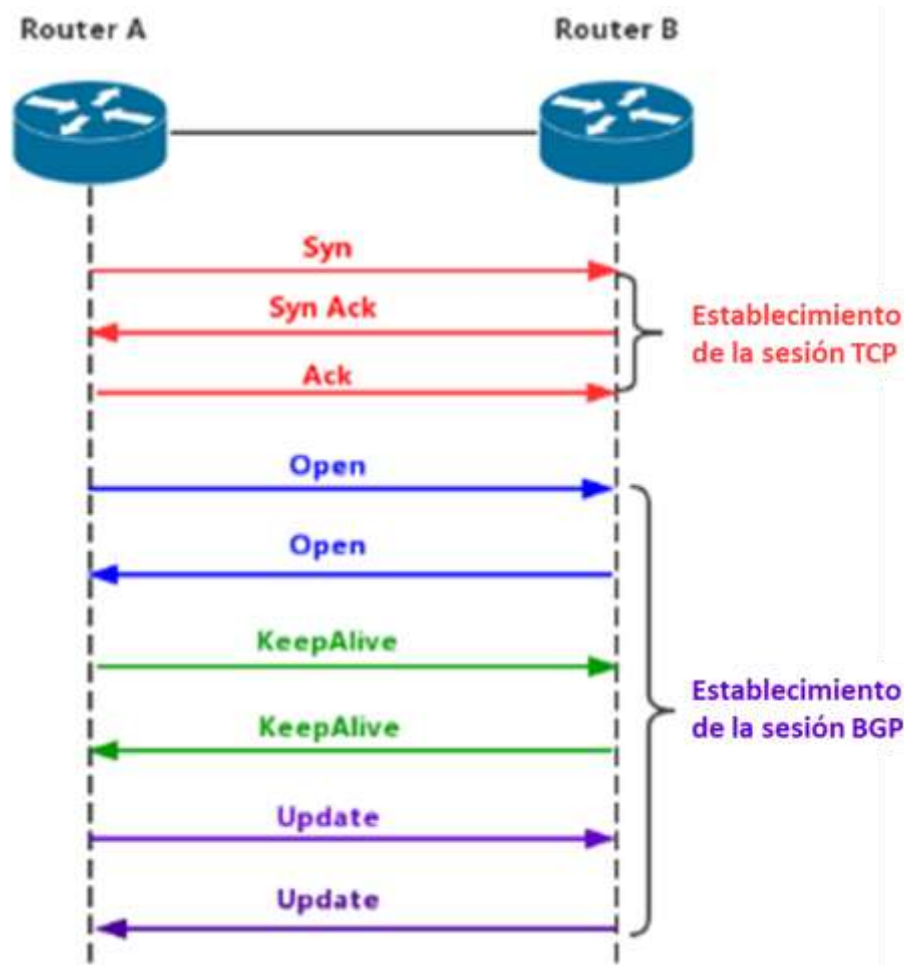


Figura 2-5: Establecimiento de sesión BGP: flujo de mensajes

BGP no solamente aporta esta información dentro de una sesión activa: cada vez que anuncia una ruta, envía un mensaje “*IP prefix: Attribute*”, con atributos que contienen información sobre accesibilidad y políticas (siguiente salto, ruta de los ASs por los que se ha pasado...).

BGP también tiene aplicación interna a los ASs. La sesión entre dos *peers* se dice que es de BGP externo (eBGP) si los dos están en ASs diferentes y de BGP interno (iBGP) si los dos están dentro del mismo AS.

2.1.4 Algunos aspectos económicos de los modelos de interconexión en Internet

Aunque los acuerdos de tránsito toman formas muy diversas, adaptadas a la realidad de los operadores que se interconectan, en el fondo de todos subyace un modelo económico sencillo: un operador paga por el tráfico que el otro le encamina hacia o desde el exterior [14].

Normalmente, este pago está más relacionado con el caudal (Gbps), con el ancho de banda utilizado, que con el volumen (GBytes) de tráfico intercambiado, aunque no está excluida esta opción, y se acompaña de compromisos mínimos, que justifiquen la inversión a realizar por el operador de tránsito, y de descuentos por volumen, que incentiven a concentrar el tráfico en unos proveedores y no en otros.

En la base de todos los acuerdos está la medida del tráfico intercambiado. Y, para evitar que los picos puntuales de información distorsionen la relación económica, se suele aplicar un sistema de medición del “Percentil 95”. El método es sencillo:

- Se realizan mediciones periódicas de volumen intercambiado (Gbits) cada cinco minutos (300 segundos).
- Se almacena un valor en forma de Gbps, dividiendo previamente el valor medido entre los 300 s a lo largo de los cuales se toma la medida.
- Mes a mes (u en otros periodos de facturación, según el acuerdo establecido) se genera una secuencia ordenada cuantitativamente para verificar la evolución del consumo de ancho de banda (Figura 2-6).

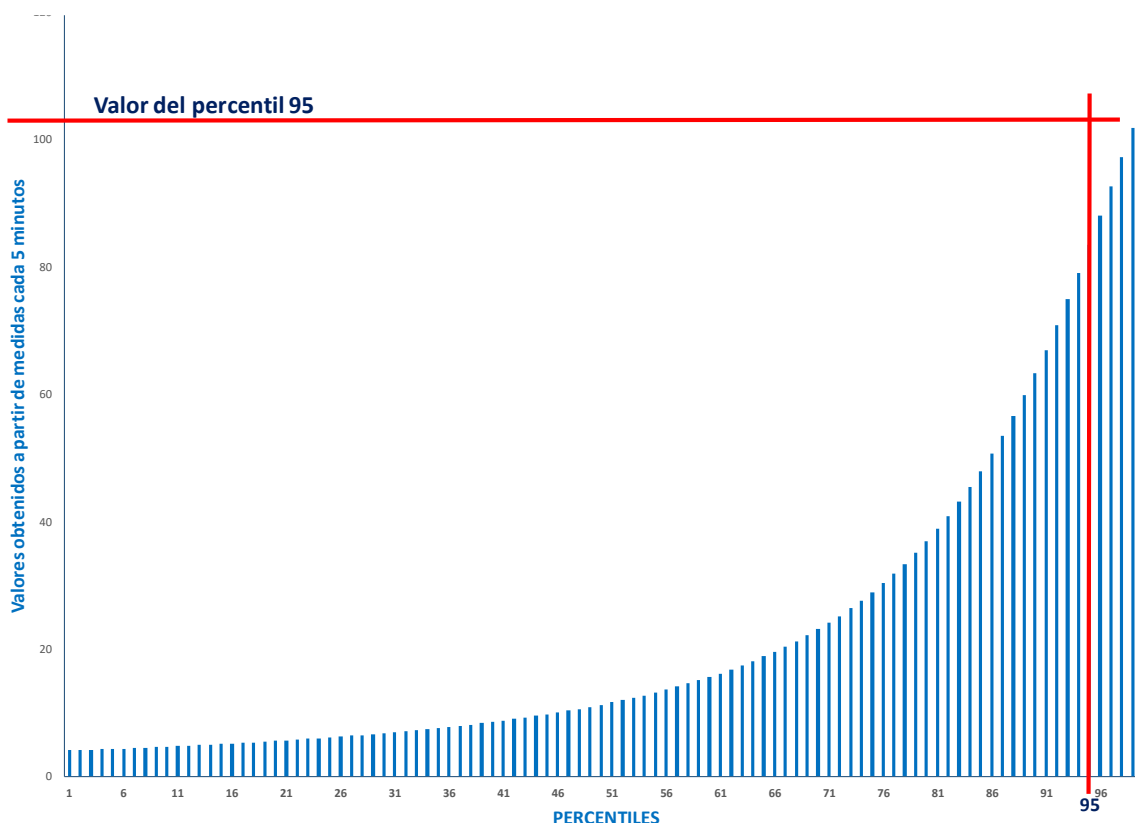


Figura 2-6: Gráfica para determinar el percentil 95 en la medida del ancho de banda

- Se descarta el 5% de las muestras más altas
- El valor más alto correspondiente al 95% de las muestras restantes se toma como medida para realizar la facturación y el pago del tránsito

Este método tiene ventajas para las dos partes:

- No penaliza al operador conectado por los picos de tráfico incontrolados como consecuencia de “avalanchas” de sus clientes (descarga de actualizaciones de software que aparecen en un día en concreto, por ejemplo).
- No se sobreestiman ni se infrautilizan los recursos de la interconexión.

Los fuertes crecimientos del tráfico de Internet de las últimas décadas y el mantenimiento de esta misma tendencia a futuro (Figura 2-7) [30] han provocado una migración de las interconexiones de tránsito hacia *sf-peering*.

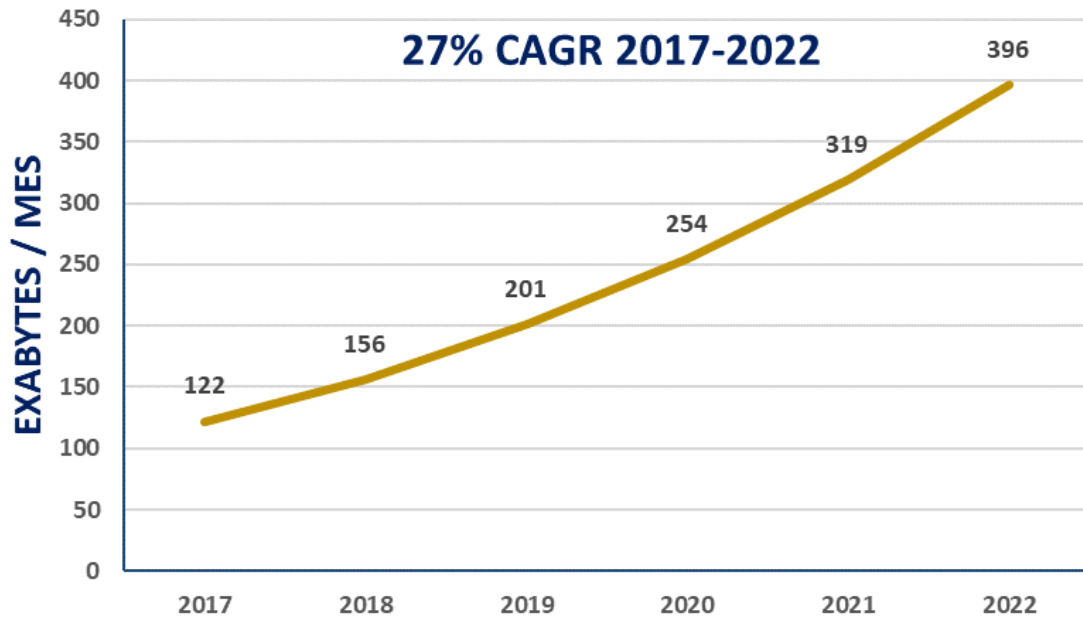


Figura 2-7: Previsiones de crecimiento del tráfico IP mundial 2017-2022

Es una situación que ha movido a los proveedores de tránsito a realizar eficiencias para poder competir, provocando una caída constante de precios (Figura 2-8) [14].

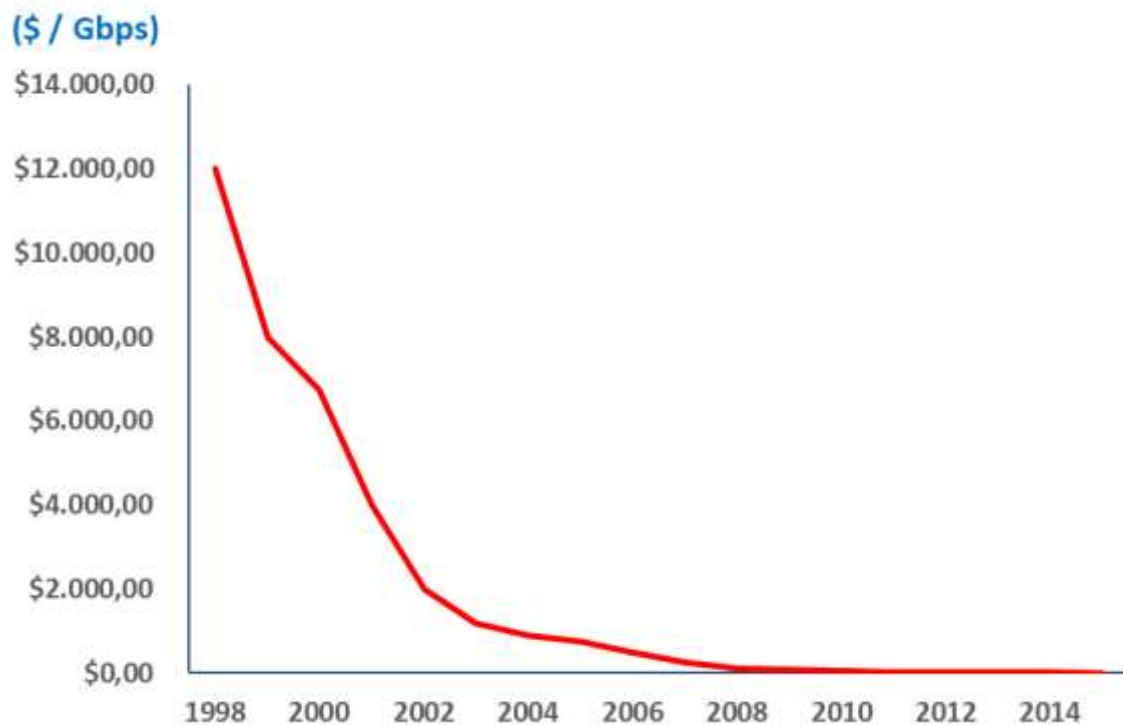


Figura 2-8: Evolución de los precios del tránsito IP en EE.UU.

Pese a todo, el número de conexiones de *peering* en el mundo y el volumen de tráfico cursado por ellas sigue creciendo.

Una de las razones es el modelo de costes de este tipo de interconexión, donde los costes no indexados con el tráfico tienen un peso mayor. Podríamos decir que los costes directamente asociados al *peering* tienen, esencialmente, estos componentes²:

- El transporte hasta el punto de interconexión (circuitos)
- Los equipos que la red destina a esta función
- El alojamiento donde albergar los equipos, que incluye espacio, energía y climatización
- Las conexiones internas y con terceros (“*cross-connections*”)
- La operación y el mantenimiento (*Hands & Eyes*) de todo lo anterior

Es importante identificar cuándo empieza a tener sentido un acuerdo de *sf-peering* frente a un acuerdo de tránsito.

Si calculamos el precio por Gbps repercutido en el *peering*, dividiendo el sumatorio de los costes anteriormente indicados por el ancho de banda total necesario para los intercambios de tráfico, y teniendo en cuenta la escasa relación con el tráfico que tienen estos costes, cuanto mayor sea el ancho de banda utilizado, más atractiva será la relación de *peering*: ver Figura 2-9 [14].

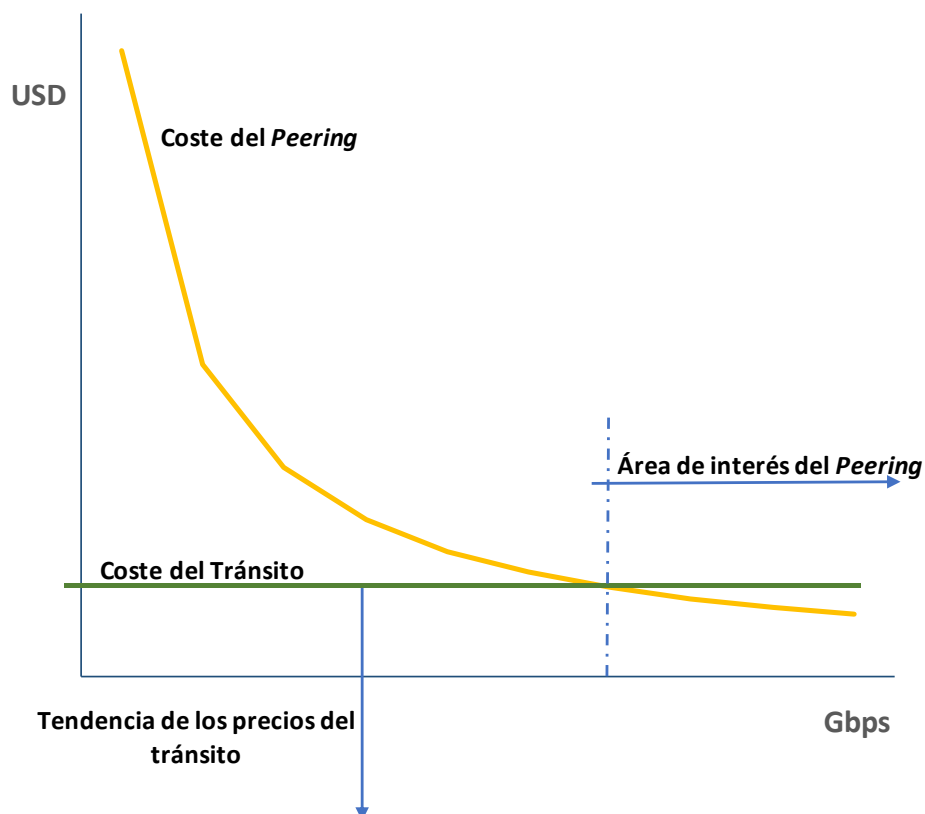


Figura 2-9: Comparativa de costes *peering* vs. tránsito

² A estos costes hay que añadir los de terminación de tráfico, pero quedan fuera del análisis por ser comunes al tránsito. Pasan a cobrar importancia en el modelo cuando la relación de *peering* se desequilibra.

La misma nos muestra claramente que el crecimiento de los anchos de banda necesarios para la interconexión forzará a la reducción de precios del tránsito para seguir siendo un modelo competitivo.

2.2 Teoría Matemática de Juegos

“Estudia situaciones de conflicto y cooperación en las que interactúan individuos racionales, analizando los comportamientos y resultados que son de esperar, bien mediante decisiones individuales, bien mediante acuerdos entre los participantes” [5]. Se ocupa del análisis de esas situaciones, donde hay que tomar decisiones para “ganar”, de acuerdo con unas reglas y sabiendo que el hecho de que hay más actores en el juego tomando sus propias decisiones influye en el resultado final [18].

Bajo otra definición, podemos decir que es una herramienta matemática para crear modelos de situaciones reales en las que las decisiones de unos actores están condicionadas por las de decisiones los demás (interdependencia estratégica) [19].

La modelización de estas situaciones es lo que se denomina “juegos”, que no dejan de ser más que representaciones formales de situaciones de conflicto o negociación en la vida real. La Teoría de Juegos permite entender los factores que influyen en esas negociaciones, predecir el comportamiento de las partes involucradas en base a un conjunto de reglas y elegir las estrategias óptimas para “ganar”, alcanzando los objetivos esperados.

Como corpus sistémico y unificado, nace en 1944, cuando Von Neumann y Morgenstern publicaron “*Theory of Games and Economic Behaviour*” [6]. En este libro, además de su propia contribución, recogían las aportaciones que otros autores venían realizando de forma dispersa desde finales del siglo XIX.

En los años posteriores, los dos autores citados y otros científicos de diferentes ámbitos, siguen enriqueciendo la Teoría con múltiples publicaciones. En 1994 se concede el Premio Nobel de Economía a Selten, Haryani y Nash, momento a partir del cual su prestigio académico se consolida definitivamente.

En este apartado, vamos a definir algunos conceptos de Teoría de Juegos que nos serán útiles para entender la propuesta de un nuevo modelo de negociación de la interconexión de Internet. No es objetivo desarrollar un compendio exhaustivo de todos los aspectos de la Teoría de Juegos, que no entra en el alcance de este Trabajo Fin de Master; solamente se mostrarán aquellos que nos proporcionen una visión panorámica de aspectos generales de la Teoría y los que, de una forma u otra, sean necesarios para entender el alcance limitado de este Trabajo.

Hay publicaciones genéricas de Teoría de Juegos que pueden ser referencias interesantes para profundizar en esta materia ([5], [6], [11], [18], [19]).

2.2.1 Elementos del juego

Establezcamos de entrada algunas definiciones sobre los elementos fundamentales que intervienen en la dinámica de un juego:

- **Jugadores:** quienes participan en el juego, toman decisiones e intentan maximizar su beneficio.
- **Acciones:** decisiones que toman los jugadores

- **Estrategia:** decisión (acción) o conjunto de decisiones que un jugador puede tomar en cada momento del juego
- **Perfil de Estrategias:** vector de estrategias que contiene una por cada uno de los jugadores
- **Resultados:** alternativas en cuanto a cómo puede finalizar un juego, que llevan aparejadas consecuencias distintas para los diferentes jugadores
- **Pagos:** “retribuciones” de los jugadores al finalizar el juego

2.2.2 Representaciones formales del juego

Se suelen usar dos representaciones formales de un juego, dependiendo de si se pone foco en la estrategia de los jugadores o en la secuencialidad de las acciones [18].

2.2.2.1 Representación extensiva

Es un grafo sin ciclos ni nodos inconexos (árbol de juego) que representa secuencialmente la toma de decisiones (acciones) de los jugadores.

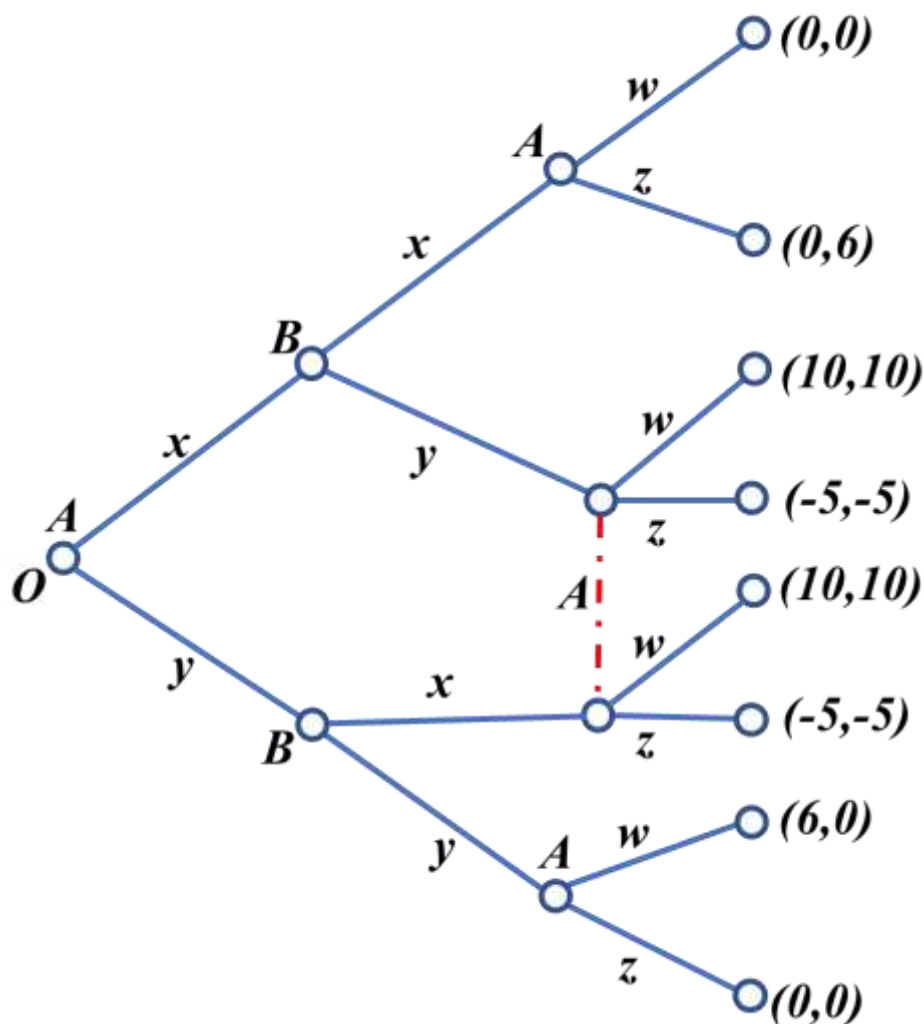


Figura 2-10: Ejemplo gráfico de representación extensiva

Asociado a cada nodo se indica quién es el jugador que puede tomar un conjunto de decisiones. Estas se representan asociadas a las diferentes ramas que parten del nodo. Al final de cada secuencia de ramas del árbol se presenta un vector con tantos componentes como jugadores: los pagos que reciben en caso de seguirse la secuencia de acciones asociada a ese final.

Formalmente la representación extensiva se expresaría como sigue³:

$$G = \{J, (X, \sigma), (A, \alpha), \{X_{i \in J}\}, \{C_{i \in J}\}, (A(c))_{c \in C}, p\}$$

donde:

- G es la identificación del juego
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$ representa el conjunto de jugadores³.
- X representa el conjunto de nodos, cada uno asociado a una situación del juego. Se identifica con O , el nodo donde comienza el juego (nodo raíz).
- La función $\sigma(x)$ relaciona cada nodo con el inmediatamente anterior a él

$$\begin{array}{ccc} \sigma: & X & \rightarrow & X \\ & x & \rightarrow & \sigma(x) \end{array}$$

$$\sigma(O) = O$$

$$\forall x \neq O, \sigma(x) = \text{nodo inmediatamente anterior a } x$$

La función $s(x)$ representa el conjunto de nodos inmediatamente posteriores a x

$$s(x) = \sigma^{-1}(x)$$

Denominamos “nodo terminal” al que no es seguido por ningún otro nodo, siendo T el conjunto de todos ellos

$$T(X) = \{x \in X: s(x) = \emptyset\}$$

Denominamos “nodo de decisión” a aquel que no es terminal (a un nodo de decisión siempre le sigue otro nodo), siendo D el conjunto de todos ellos

$$D(X) = \{x \in X: s(x) \neq \emptyset\}$$

$$D(X) = X - T(X)$$

No hay nodos de decisión comunes a más de un jugador.

³ La intervención del azar toma la forma de un jugador más, el “0”: $J = \{0, 1, 2, \dots, n\}$

Además, se introduce una función que asigna probabilidades a las acciones correspondientes al azar ($\rho(x)$): $G = \{J, (X, \sigma), (A, \alpha), \{X_{i \in J}\}, \{C_{i \in J}\}, (A(c))_{c \in H}, \rho, p\}$

$$\begin{array}{ccc} \rho: & C_0 \times A & \rightarrow & [0, 1] \\ & (c, a) & \rightarrow & \rho(c, a) \end{array}$$

$$a \notin A(c) \Rightarrow \rho(c, a) = 0$$

$$\forall c \in C_0, \sum_{a \in A(c)} \rho(c, a) = 1$$

$$\bigcup_{i \in J} X_i = D(X)$$

$$\forall i, j \in J / i \neq j \Rightarrow X_i \cap X_j = \emptyset$$

- A representa el conjunto de todas las decisiones (acciones) que pueden ser tomadas
- La función $\alpha(x)$ relaciona cada nodo con la acción que provoca la transición entre el nodo anterior y él mismo

$$\begin{array}{ccc} \alpha: & X - \{O\} & \rightarrow & A \\ & x & \rightarrow & \alpha(x) \end{array}$$

Las acciones que provocan transiciones distintas (conducen a nodos diferentes) desde un mismo nodo son obligatoriamente diferentes

$$\forall x, x' \in s(x) / x \neq x' \Rightarrow \alpha(x) \neq \alpha(x')$$

$A(x)$ representa al conjunto de decisiones (acciones) que se pueden tomar desde un determinado nodo de decisión

$$\forall x \in D(X), \quad A(x) = \{a \in A: \exists x' \in s(x) \text{ tal que } a = \alpha(x')\}$$

- Se define “conjunto de información” como los nodos de decisión de un determinado jugador entre los que no puede diferenciar, pues estando en uno de ellos, al optar por una acción, carece de datos para saber en cual está.

C representa el conjunto de los “conjuntos de información”⁴

$$C = \bigcup_{i \in J} C_i$$

Donde C_i son los conjuntos de información de un determinado jugador.

- La función $c(x)$ relaciona los nodos con los conjuntos de información de los que forman parte

$$\begin{array}{ccc} c: & X & \rightarrow & C \\ & x & \rightarrow & c(x) \end{array}$$

- Los nodos cumplen las siguientes condiciones:
 - En cada nodo del conjunto están disponibles exactamente las mismas decisiones (acciones): no hay diferenciación entre ellos
$$c(x_1) = c(x_2) \Rightarrow A(x_1) = A(x_2)$$
 - Un nodo no pertenece a más de un conjunto
 - Un conjunto contiene nodos de un solo jugador
- $A(c)$ representa las decisiones (acciones) que se pueden tomar en un mismo conjunto de información

⁴ En la representación extensiva los nodos que forman un conjunto de información se unen mediante una recta discontinua o, alternatively, englobándolos en una curva cerrada, también discontinua (ver Figura 2-10)

$$A(c) = \{a \in A: a \in A(x) \text{ para } x \in c\}$$

- p proporciona el pago de cada jugador al finalizar el juego en un determinado nodo terminal. Se denomina “función de pagos”.

$$\begin{aligned} p: \quad T(X) &\rightarrow R^n \\ x &\rightarrow p(x) = (p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)) \end{aligned}$$

donde $p_i(x)$ representa el pago de cada jugador

2.2.2.2 Representación estratégica

Representa exclusivamente los jugadores, sus estrategias y los pagos que reciben.

En juegos con dos jugadores, se utiliza un rectángulo que refleja en cada lado las estrategias de uno de los jugadores (las acciones que puede tomar) y su contenido son los pagos asociados a las combinaciones de sus decisiones (acciones).

		Jugador B			
		x	y	...	v
Jugador A	x	(0,0)	(0,6)	...	(10,5)
	w	(6,0)	(-5,5)	...	(5,5)

	z	(5,-10)	(-5,5)	...	(0,0)

Figura 2-11: Ejemplo gráfico de representación estratégica

Formalmente se representaría como sigue

$$G = \{J, (S_i)_{i \in J}, (u_i)_{i \in J}\}$$

Donde:

- G es la identificación del juego
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$ representa los jugadores.
- $S_i = \{s_i^1, s_i^2, \dots, s_i^n\}$ representa las estrategias de un jugador.

Una estrategia de un jugador asocia cada uno de sus conjuntos de información con las acciones que puede llevar a cabo

$$\begin{aligned} \rho: \quad C_i &\rightarrow A \\ c &\rightarrow s_i(c) \in A(c) \end{aligned}$$

Un perfil de estrategias es un desarrollo del juego

$$\begin{aligned} \forall s_i \in S_i, i \in J, \quad s &= (s_1, s_2, \dots, s_n) \\ s &\in S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n \end{aligned}$$

donde S representa al conjunto de perfiles.

- Tras tomarse todas las decisiones de un determinado perfil s , un jugador i recibe como pago u_i .

La función que, aplicada al nodo terminal $n(s)$ donde desemboca el perfil s , proporciona el pago asociado, se denomina función de pagos (p)

$$u_i(s) = p_i(n(s))$$

2.2.3 Tipos de juegos

Se utilizan varios criterios de clasificación para los juegos. Algunos de los más comunes son los siguientes:

- Número de jugadores

Diferencia los juegos de 2 jugadores frente a los de N , aunque pueden existir juegos monojugador.

- Pagos

Juegos de suma constante: todos los jugadores pueden ganar porque hay una cantidad a repartir.

Juegos de suma nula: unos jugadores ganan lo que otros pierden.

Juegos de suma no nula: no siempre lo que unos jugadores ganan es lo que otros pierden.

- Existencia de acuerdos previos entre los jugadores:

Diferencia los **juegos cooperativos**, donde los jugadores acuerdan las acciones a tomar, frente a los **juegos no cooperativos**, en que las acciones de cada jugador se llevan a cabo sin acuerdo con los otros actores del juego.

- El conocimiento que tienen los jugadores acerca de las acciones que toman los demás

Se clasifican los juegos en **estáticos**, cuando los participantes en el juego llevan a cabo sus acciones (decisiones) de forma simultánea, sin posibilidad de tener un conocimiento cruzado sobre las mismas ni sobre sus consecuencias; de los **dinámicos**, en que la toma de decisiones es secuencial, por lo que permite conocer las consecuencias de las decisiones de otros jugadores antes de tomar las propias.

- La información disponible

Juegos de información completa: todos los jugadores conocen toda la información (reglas, decisiones, ...), incluidas las consecuencias para sí y los demás de las decisiones tomadas, y conocen que los demás jugadores también tienen toda la información.

Juegos de información incompleta: no todos los jugadores conocen toda la información del juego, en particular las consecuencias de algunas decisiones.

- El azar

Diferenciamos aquellos donde el azar tiene un papel en el juego (lanzamiento de un dado) de los que no lo tiene y solo intervienen las decisiones de los jugadores.

2.2.4 Soluciones de un juego

Cuando un problema depende de decisiones individuales, su solución es el resultado que más conviene (óptimo) al jugador que se plantea el problema. Para cada problema puede existir una o más de una solución.

Cuando el problema afecta a múltiples jugadores, es evidente que alcanzar la solución de un juego no va a depender de las decisiones que tome un solo jugador.

En estos casos, la “solución” viene determinada por un conjunto de perfiles de estrategias, cada uno de los cuales representa un conjunto de acciones de juego que pueden ser llevadas a cabo por todos los jugadores a lo largo del mismo.

Se denomina “concepto de solución” al procedimiento para identificar una de las soluciones del juego [18].

2.2.4.1 Soluciones mediante dominación

Una estrategia es estrictamente dominante cuando supera a cualquier otra que un jugador pueda tomar respondiendo a las estrategias de los otros jugadores. Si solamente iguala a alguna otra estrategia posible, se llama débilmente dominante (o dominante). El número de estrategias dominantes de un jugador puede variar e, incluso, puede no existir ninguna.

Por oposición, el resto de estrategias se dicen dominadas (o débilmente dominadas) y estrictamente dominadas.

Es lógico pensar que un jugador racional (el que opta por maximizar pagos y despliega estrategias encaminadas a esta maximización) solamente elegirá estrategias dominantes o, al menos, no elegirá estrategias dominadas (inferiores a otras estrategias del mismo jugador) y no supondrá que sus rivales vayan a elegir las.

Se soluciona un juego mediante dominación cuando se encuentran perfiles de estrategias en las que todos los jugadores tienen estrategias dominantes.

En un contexto de jugadores racionales (y donde todos saben que los otros lo son), si hay unos jugadores con estrategias dominantes y otros sin ellas, se aplican un proceso iterativo para la búsqueda de soluciones, en el cual se busca reducir el juego a otro donde se hayan eliminado las estrategias dominadas. Esta reducción se aplica sucesivamente hasta que no queden estrategias dominadas para ningún jugador. Los perfiles compuestos por las estrategias restantes serán soluciones del juego.

Este proceso de eliminación recibe el nombre de algoritmo estándar.

Cuando el proceso se realiza eliminando las estrategias estrictamente dominadas, se denomina Eliminación Iterativa Estricta (EIE). Si se realiza eliminando estrategias débilmente dominadas, se denomina Eliminación Iterativa Débil (EID).

Decimos de un juego que es resoluble por dominación cuando tras un proceso EID obtenemos una solución única, o si se encuentran varias soluciones, en todas ellas los jugadores obtienen los mismos pagos.

Óptimo de Pareto

Si, para todos los jugadores, al comparar dos perfiles de estrategias, en uno de ellos los pagos siempre son iguales o mayores que en el otro y, para un jugador, al menos, el pago es mayor, decimos que el primer perfil domina al segundo en el sentido de Pareto

Un perfil es un Óptimo de Pareto si ningún otro perfil lo domina en el sentido de Pareto.

Cambiar de un Óptimo de Pareto a otro perfil supone que algún jugador saldrá perdiendo y alguno saldrá ganando estrictamente.

2.2.4.2 Soluciones mediante equilibrio: Equilibrio de Nash

En un juego de información completa, con jugadores racionales, que llevan a cabo sus mejores estrategias, y donde hay un conocimiento público de ello, un Equilibrio de Nash [24] es aquel perfil óptimo para todos los jugadores, dadas las estrategias que pueden seguir los otros.

En el Equilibrio todos los jugadores no obtienen el mejor pago entre todos los posibles, sino que obtienen el mejor pago en función de las estrategias que los demás pueden seguir. Por eso, ante el temor de empeorar su resultado, los jugadores tienden a permanecer en la situación de Equilibrio: si los demás no modifican su estrategia él no tiene opciones de mejora.

En este caso, la identificación de soluciones implica una sistematización de la búsqueda de Equilibrios de Nash. Para ello, se buscan todas las estrategias con que un jugador puede responder de forma óptima ante cualquier combinación de estrategias de los otros. Es lo que se denomina correspondencia de respuesta óptima.

2.2.5 Juegos cooperativos

Son juegos donde es posible la alianza (coalición) de grupos de jugadores para acordar (de forma vinculante) su toma de decisiones. En estos juegos, más que el comportamiento individual de los jugadores, el interés del análisis se encuentra en el comportamiento de las coaliciones establecidas.

Cuando los jugadores actúan en una coalición, los pagos obtenidos se reparten entre ellos

Un juego

$$G = (J, v)$$

está definido en forma de función característica (o forma coalicional) con utilidades transferibles si:

- J es un conjunto finito de jugadores
- Existe una “función característica” $v(S)$, para asignar a cada coalición S la utilidad mínima que puede obtener por actuar como tal, y que se denomina “valor de coalición”. La ausencia de coalición tiene un valor 0: $v(\phi)=0$.

$$\begin{array}{lll} v: & P(J) & \rightarrow \mathbb{R} \\ & S & \rightarrow v(S) \end{array}$$

$P(J)$ representa al conjunto de partes de J formado por las coaliciones posibles entre jugadores (incluida la opción de ausencia de coaliciones, ϕ).

En este tipo de juego, donde varios jugadores forman una coalición, hay que definir cómo se realizará el reparto de los pagos entre ellos.

A priori se establece un reparto del valor mínimo de la coalición, que es el que proporciona la función característica. El conjunto de estas “preimputaciones” cumple un principio de

eficiencia: los componentes de la coalición reciben un conjunto de pagos tal, cuya suma resulte ser igual al “valor de la coalición”.

Se formaliza como un conjunto de vectores x , que representan el pago para cada uno de los jugadores i de una coalición $S \subset J$

$$PI(J, v) = \{x: x(J) = v(J)\}$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$$

$$x(S) = \sum_{i \in S} x_i$$

$$x(J) = \sum_{i=1}^n x_i$$

$$x(\emptyset) = 0$$

Pero ningún jugador estaría dispuesto a entrar en una coalición si el pago recibido fuese menos que si actuara de forma individual. Así, las “imputaciones” finales de los pagos a los jugadores de una coalición será un conjunto de vectores de pagos que respete este denominado principio de racionalidad individual

$$I(J, v) = \{x: x_i \geq v(\{i\}), \forall i \in J\}$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in PI(J, v)$$

$$I(J, v) = \{x: x(J) = v(J), x_i \geq v(\{i\}), \forall i \in J\}$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$$

El modelo de negociación de Nash, que abordaremos en el próximo apartado, es una solución para este tipo de juegos cooperativos. En el mismo se desarrollará el modelo de Nash-Peering, aplicando dicha solución con el objetivo de obtener un resultado equitativo en las negociaciones de interconexión entre diferentes actores de la Red.

3 El modelo de interconexión Nash-Peering

En este apartado se hace una descripción de la solución que Nash propuso para el problema de la negociación, y de cómo se aplica la misma a las negociaciones de interconexión de redes IP, dando lugar al modelo Nash-Peering.

También se recoge un acercamiento a un modelo de costes para la interconexión de redes sobre el que apoyar los análisis que se llevan a cabo en apartados posteriores.

3.1 La solución de Nash al problema de la negociación

Un juego cooperativo implica una negociación para acordar el escenario de decisiones consensuadas que lo definen.

Nash planteó una solución al problema de la negociación entre dos jugadores⁵ en el marco de un juego cooperativo, de suma cero y con información completa, basado en un comportamiento completamente racional de los jugadores [20], lo que quiere decir que cada jugador intentará en la negociación maximizar el pago recibido.

Nash formalizó la negociación como la existencia de múltiples alternativas, dentro de un “conjunto factible”, al alcance de dos jugadores, que tienen preferencias distintas sobre las mismas. Negociar y elegir una de ellas supone establecer un compromiso entre ambos jugadores; no elegir ninguna desemboca en un “punto de amenaza”. El objetivo del modelo de negociación es predecir cómo los dos jugadores pueden alcanzar el acuerdo, superando sus diferencias [22]. Definió como “solución de negociación” a la función que obtiene aquella alternativa del conjunto que proporciona la mejor solución para el acuerdo.

Nash también propuso dos aproximaciones para abordar el análisis del problema de la negociación [21].

La primera de ellas convierte las decisiones de la negociación (juego cooperativo) en una sucesión de movimientos dentro de un juego no-cooperativo. Para cada jugador, asocia un vector de pagos con cada perfil de estrategias e identifica uno de los perfiles donde cada estrategia que lo compone sea la mejor respuesta posible en cada movimiento a la estrategia que elija el otro jugador (a modo de Equilibrio de Nash no-cooperativo).

La segunda fija como axiomas un conjunto de propiedades, de forma que su cumplimiento determina una solución al problema de la negociación que es única (“solución de Nash”). Esta solución es coincidente con el perfil de estrategias obtenido en la primera alternativa. Estos axiomas son:

1. Los pagos de los jugadores deben ser iguales o mejores que en el caso de no haber establecido la negociación (Factibilidad de la Negociación)
2. No existe ninguna otra solución que sea mejor para los dos jugadores simultáneamente que la proporcionada por la solución de Nash, ni igual para uno de ellos y mayor para el otro (Optimización de Pareto)
3. Si el problema es simétrico alrededor de una línea de 45°, entonces la salida negociada se encontrará sobre esta línea (Simetría). En otras palabras: si el juego es simétrico, los pagos de ambos jugadores deben ser iguales.

⁵ Aunque Nash formuló su modelo de negociación para dos jugadores, y en el caso de la negociación que afecta a este Trabajo es suficiente, es extensible al caso de N jugadores.

4. Si, manteniendo constante el punto de amenaza, el conjunto factible se reduce, pero la alternativa elegida sigue siendo viable, esta debe seguir siendo la solución al problema (Independencia de Alternativas Irrelevantes).

Usando una representación formal estratégica (ver 2.2.2.2) para un juego cooperativo de 2 jugadores:

$$G = \{J, (S_i)_{i \in J}, (u_i)_{i \in J}\}$$

- $J = \{1, 2\}$
- $S_1 = \{s_1^1, \dots, s_1^n\}$ son las estrategias del jugador 1
- $S_2 = \{s_2^1, \dots, s_2^n\}$ son las estrategias del jugador 2

Cada par de estrategias (s_1, s_2) lleva asociado un pago para cada jugador, (u_1, u_2)

$$u_1 = p_1(s_1, s_2)$$

$$u_2 = p_2(s_1, s_2)$$

Se define U como el universo de pagos (utilidades) posibles. Dado que trabajamos solamente con dos jugadores, U se representa en un plano.

En caso que ambos jugadores no llegasen a un acuerdo (punto de amenaza), la pareja de utilidades sería

$$(u_1^*, u_2^*) \in U$$

El interés de la negociación se centra en las parejas de pagos B que puedan alcanzarse como resultado de la misma:

$$B = (\overline{u_1}, \overline{u_2})$$

Se define la función de pagos

$$(\overline{u_1}, \overline{u_2}) = f(U, (u_1^*, u_2^*))$$

que, a partir el universo de pagos y del punto de amenaza, obtiene como resultado el vector de pagos resultante de la negociación.

Nash postuló que esa función de pagos responde a

$$(\overline{u_1}, \overline{u_2}) = \max_{(u_1, u_2) \in U} ((u_1 - u_1^*)(u_2 - u_2^*))$$

siendo $B = (\overline{u_1}, \overline{u_2})$ la “solución de Nash”.

3.2 Descripción del modelo de interconexión Nash-Peering

Veamos la aplicación del Modelo de Negociación de Nash a un caso concreto, que posteriormente será referencia para el nuevo modelo de interconexión, Nash-Peering, propuesto por Zarchy et al. [12], que se está analizando en este Trabajo.

Supongamos un juego de 2 jugadores (A, B) cuyo objetivo sea obtener una determinada recompensa (R), para cuyo reparto se establecerá una negociación entre ellos. Para conseguirlo cada uno de ellos deberá incurrir en determinados costes ($-C_A^*$ y $-C_B^*$), que no tienen por qué ser los mismos para los dos jugadores.

Recurriendo al modelo de negociación de Nash (ver 3.1) obtendríamos:

- Punto de amenaza: (C_A^*, C_B^*)

Son las ganancias (ahorros en este caso) que obtienen los dos jugadores en caso de no concluir con éxito la negociación. Se denomina también “opción externa” a la negociación.

Para que la negociación tenga sentido, las utilidades totales alcanzadas tras la misma deben ser superiores a las obtenidas de no abordarla

$$R - (C_A^* + C_B^*) > 0$$

- Supongamos que en el reparto A recibe una cantidad X de la recompensa y B el resto

$$R_A = X$$

$$R_B = R - X$$

- La función de pagos de Nash, que proporcionaría el vector de utilidades (pagos) resultante, sería

$$(\overline{u}_1, \overline{u}_2) = \max_{(u_1, u_2) \in U} ((u_1 - u_1^*)(u_2 - u_2^*))$$

- Tomamos la función

$$f(X) = (u_1 - u_1^*)(u_2 - u_2^*) = (X - C_A^*)(R - X - C_B^*)$$

$$f(X) = -X^2 + (R + C_A^* - C_B^*)X - C_A^*(R - C_B^*)$$

- Derivamos para obtener el máximo

$$\frac{d(f(x))}{dx} = -2X + (R + C_A^* - C_B^*) = 0$$

$$\left[\frac{d^2(f(x))}{dx} = -2 < 0 \Rightarrow \text{máximo} \right]$$

- De donde

$$R_A = X = \frac{R + C_A^* - C_B^*}{2} = C_A^* + \frac{R - (C_A^* + C_B^*)}{2}$$

$$R_B = R - X = \frac{R - C_A^* + C_B^*}{2} = C_B^* + \frac{R - (C_A^* + C_B^*)}{2}$$

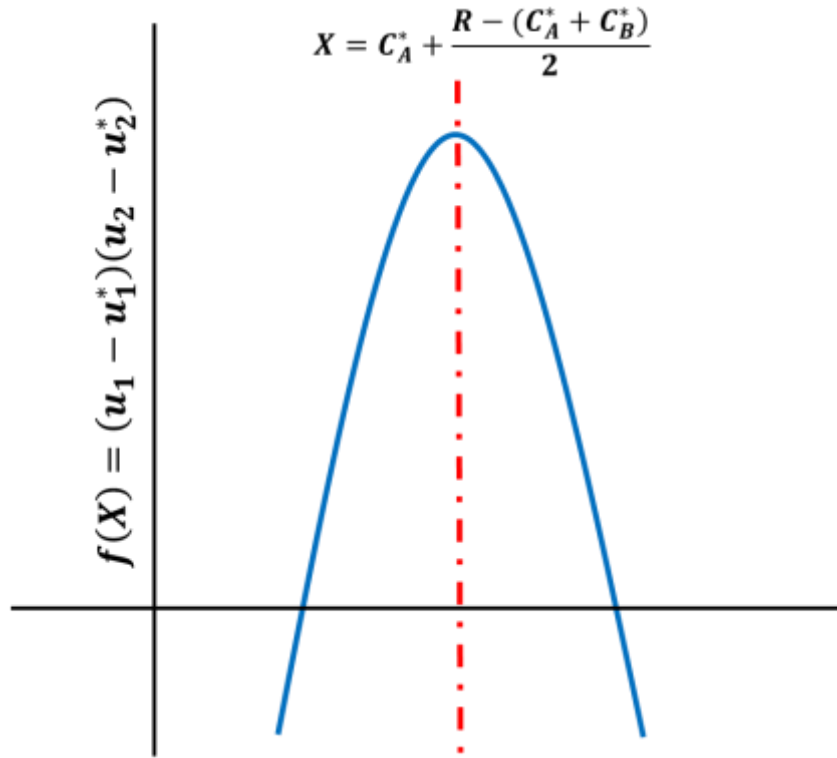


Figura 3-1: Nash-Peering: función de pagos

Si denominamos excedente al diferencial entre la recompensa y los costes totales incurridos para alcanzarla

$$\Delta = R - (C_A^* + C_B^*) > 0$$

el Modelo de Negociación de Nash postula que la opción “más justa” es que cada jugador reciba el pago correspondiente a su punto de amenaza (u “opción externa”) más la mitad del excedente generado (simetría). Es una solución optimizada de acuerdo con Pareto, ya que es el punto que maximiza el retorno para los dos jugadores simultáneamente

$$R_A = C_A^* + \frac{\Delta}{2}$$

$$R_B = C_B^* + \frac{\Delta}{2}$$

El supuesto anterior sería equivalente a la situación que se presenta cuando dos operadores que cursan tráfico a través de un tercero para una determinada ruta (tránsito) deciden establecer una interconexión directa (*peering*), para lo cual inician negociaciones.

Veamos el caso representado en la Figura 3-2.

El operador A cursa un flujo de tráfico T hacia un destino “d” en la red del operador B. El tráfico se encamina a través de la red del operador C, de acuerdo con un modelo de interconexión de tránsito. Los costes asociados al tránsito para A y B son, respectivamente, C_A^* y C_B^* .

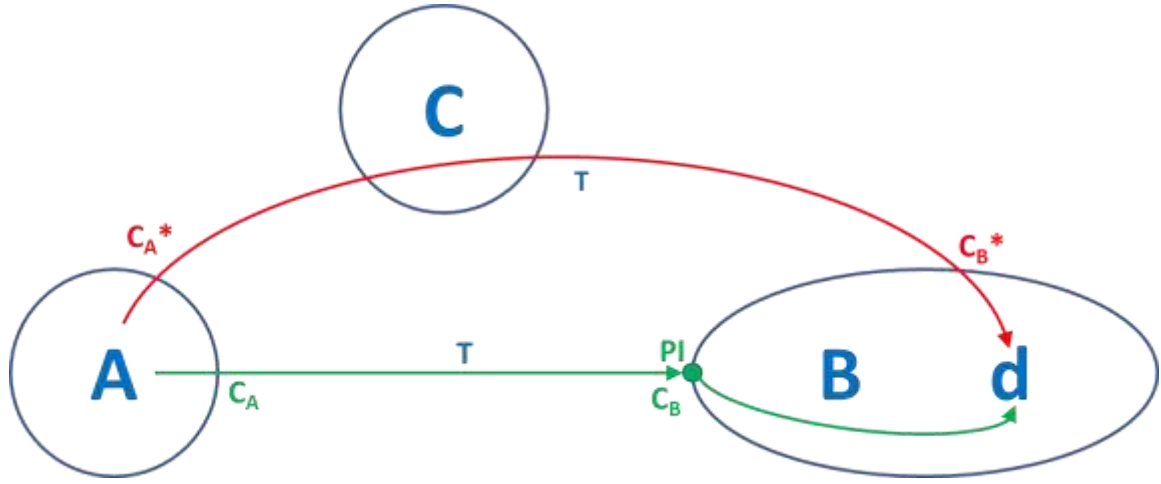


Figura 3-2: Flujos de tráfico en tránsito e interconexión directa (*peering*)

A y B mantienen una negociación para establecer interconexión directa en el punto de interconexión PI. B anunciará a través de la interconexión una ruta BGP que permita alcanzar el destino “d”. Los costes asociados a esta nueva interconexión entre A y B son, respectivamente, C_A y C_B .

Con los modelos actuales, esto supone establecer unos acuerdos de *peering* sin intercambio económico entre los operadores A y B (*sf-peering*). La principal barrera que se presentaría en esta negociación estaría relacionada con los costes asociados a la nueva interconexión, que, por ser un acuerdo sin intercambio económico, no tendrían una compensación directa para ambos operadores (probablemente sí para el operador A, que se ahorraría los costes del tránsito, pero no necesariamente para el operador B).

Analicemos esta negociación aplicando una negociación de Nash para establecer un modelo de *peering* que denominamos Nash-Peering [12] y que solamente tendrá en cuenta los costes (o los diferenciales de ingresos y costes en un caso más general) incurridos por los jugadores, a la hora de identificar la solución final al problema de negociación, que será una “solución de Nash”.

En esta negociación el punto de amenaza (opción externa) es el mantenimiento de la situación de tránsito actual, con los costes que asume cada operador en este caso

$$(u_A^*, u_B^*) = (-C_A^*, -C_B^*)$$

Evidentemente, ambos pagos (utilidades) son negativos (costes). Estos costes comprenden los costes de tránsito por cursar el tráfico a través de C y los del establecimiento y mantenimiento de las interconexiones con este operador⁶.

Al establecer la nueva interconexión se genera un excedente derivado del diferencial de costes para ambos operadores, que justificará la negociación sobre la misma siempre que sea positivo y aporte beneficios económicos a ambos operadores

$$(u_A, u_B) = (-C_A, -C_B)$$

$$\Delta = (C_A^* + C_B^*) - (C_A + C_B)$$

$$\Delta > 0$$

⁶ En esta negociación tanto (u_A^*, u_B^*) como (u_A, u_B) son costes: valores negativos, en contraste con el juego planteado al principio de 3.2 donde eran ahorros y recompensas: positivos

Si hacemos una aproximación gráfica al modelo, exclusivamente desde el punto de vista de la sensibilidad a los costes, tendremos para cada uno de los momentos de la negociación

$$C_T = C_e + C_i$$

siendo C_T los costes totales, C_i los necesarios para el establecimiento de la interconexión (costes “internos”) y C_e los costes propios de la interconexión, los costes del tráfico (costes “externos”). Tenemos:

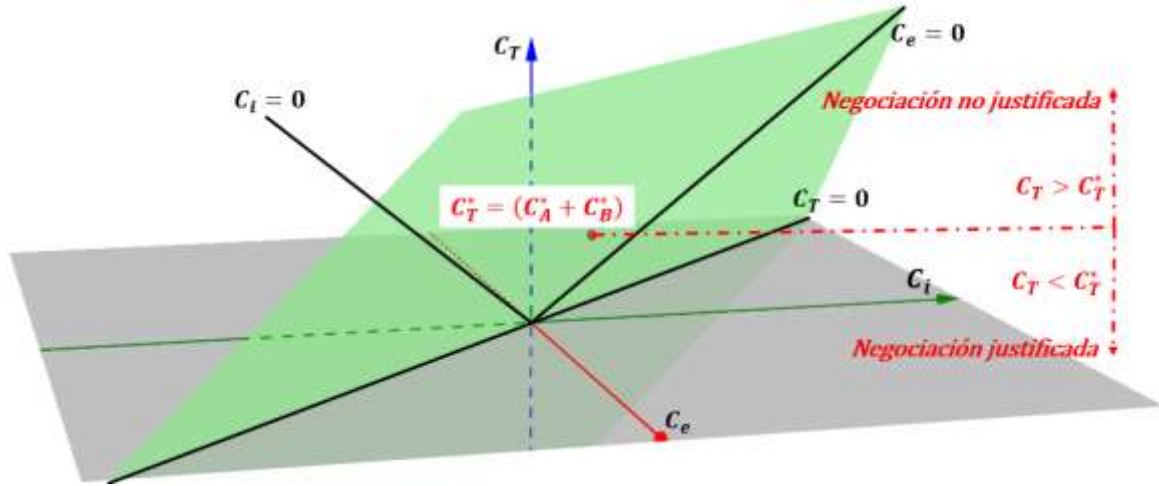


Figura 3-3: Nash-Peering: sensibilidad a costes del modelo

donde los costes totales son un semiplano sobre el que se ubican, como un punto, los costes actuales en cada momento.

Una vez ubicado en el plano el punto de los costes totales antes de la interconexión,

$$C_T^* = (C_A^* + C_B^*)$$

la misma está justificada, desde el punto de vista de una solución de Nash, cuando el punto que representa los costes totales después de la interconexión se ubica en el plano por debajo de aquel

$$C_T = (C_A + C_B) < C_T^*$$

De acuerdo con lo que veíamos al principio de este apartado, la Negociación de Nash concluye en una distribución del excedente a partes iguales entre los jugadores. Esto implica en el modelo de interconexión Nash-Peering que debe existir un pago entre los operadores que se interconectan para compensar que el diferencial de costes de ambos, antes y después de la interconexión, no es el mismo: el operador más beneficiado realizará ese pago al menos beneficiado por la misma.

Trabajemos bajo la hipótesis de que A se beneficia más que B de la interconexión

$$(C_A^* - C_A) > (C_B^* - C_B)$$

Por lo que A realizará un pago $p > 0$ a B⁷, siendo p la mitad del diferencial de “beneficios” obtenidos por los dos operadores, de forma que el resultado final sea una solución “justa” (equilibrada), donde los beneficios de la interconexión sean los mismos para ambos

⁷ Si p resultase negativo, el pago lo realizaría B a A

$$p = \frac{(C_A^* - C_A) - (C_B^* - C_B)}{2}$$

$$(C_A^* - C_A) - p = (C_B^* - C_B) + p$$

De esta manera la utilidad (pago) derivada de la negociación para los dos operadores estará compuesta por sus propios costes en la nueva interconexión y el pago realizado entre ambos, para uno negativo y para el otro positivo

$$\overline{u}_A = -C_A - p$$

$$\overline{u}_B = -C_B + p$$

De forma que

$$\begin{aligned}\overline{u}_A &= -C_A - \frac{(C_A^* - C_A) - (C_B^* - C_B)}{2} = \frac{-C_A^* - C_A + C_B^* - C_B}{2} \\ &= -C_A^* + \frac{(C_A^* + C_B^*) - (C_A + C_B)}{2} = u_A^* + \frac{\Delta}{2} \\ \overline{u}_B &= -C_B + \frac{(C_A^* - C_A) - (C_B^* - C_B)}{2} = \frac{C_A^* - C_A - C_B^* - C_B}{2} \\ &= -C_B^* + \frac{(C_A^* + C_B^*) - (C_A + C_B)}{2} = u_B^* + \frac{\Delta}{2}\end{aligned}$$

y el vector de pagos (utilidades) final queda

$$(\overline{u}_A, \overline{u}_B) = \left(\left(u_A^* + \frac{\Delta}{2} \right), \left(u_B^* + \frac{\Delta}{2} \right) \right)$$

Y, como se ve, el modelo de interconexión Nash-Peering proporciona una solución que es solución de Nash, puesto que el excedente de la interconexión se reparte a partes iguales entre ambos jugadores. Evidentemente, siendo el excedente positivo ($\Delta > 0$), se cumple que cada uno de ellos recibe un pago superior en esta solución que en el punto de amenaza (tránsito), por lo que la negociación es factible de acuerdo con el modelo de Negociación de Nash.

De la formulación anterior se deriva, además, la existencia de una relación lineal entre el pago realizado por uno de los dos jugadores y el excedente de la negociación, que responde a la ecuación

$$p = \frac{\Delta}{2} - (C_B^* - C_B)$$

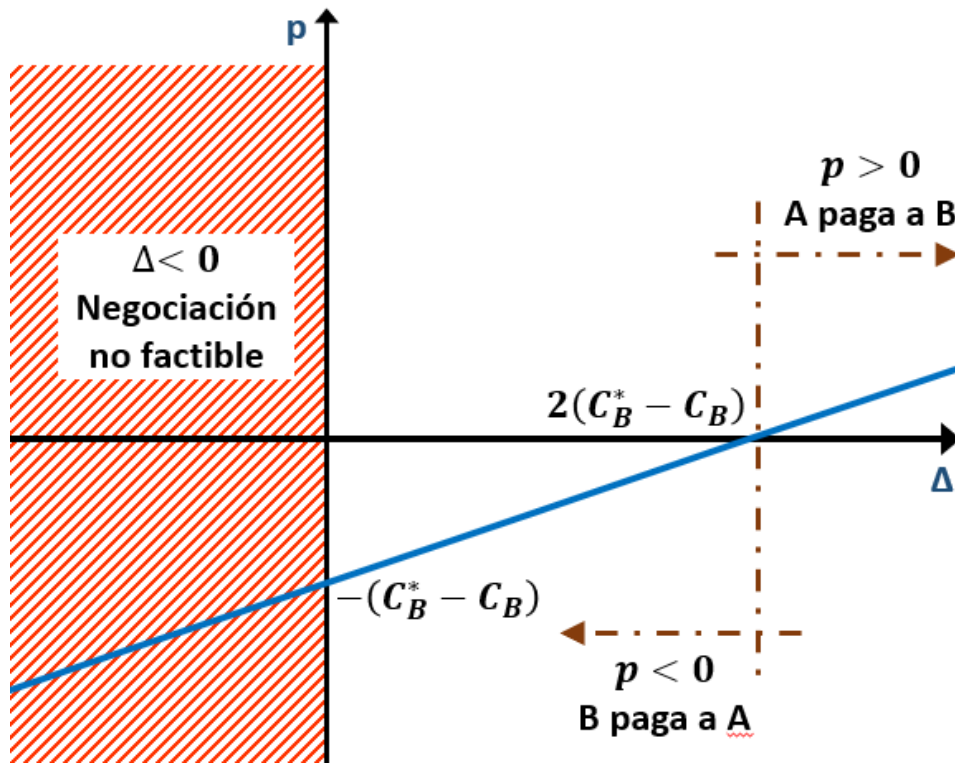


Figura 3-4: Nash-Peering: relación entre pago (p) y excedente (Δ)

Si nos planteamos la hipótesis contraria a la del desarrollo anterior, y B es quien se beneficia más de la interconexión

$$(C_A^* - C_A) < (C_B^* - C_B)$$

el pago debe realizarlo B a A, pero, dado que es un modelo simétrico, donde no hay diferenciación entre los jugadores, la solución será la misma

$$p = \frac{(C_B^* - C_B) - (C_A^* - C_A)}{2}$$

$$(C_A^* - C_A) + p = (C_B^* - C_B) - p$$

$$\bar{u}_A = -C_A + p$$

$$\bar{u}_B = -C_B - p$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_A &= -C_A + \frac{(C_B^* - C_B) - (C_A^* - C_A)}{2} = \frac{C_B^* - C_B - C_A^* - C_A}{2} \\ &= -C_A^* + \frac{(C_A^* + C_B^*) - (C_A + C_B)}{2} = u_A^* + \frac{\Delta}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_B &= -C_B - \frac{(C_B^* - C_B) - (C_A^* - C_A)}{2} = \frac{-C_B^* - C_B + C_A^* - C_A}{2} \\ &= -C_B^* + \frac{(C_A^* + C_B^*) - (C_A + C_B)}{2} = u_B^* + \frac{\Delta}{2} \end{aligned}$$

$$(\bar{u}_A, \bar{u}_B) = \left(\left(u_A^* + \frac{\Delta}{2} \right), \left(u_B^* + \frac{\Delta}{2} \right) \right)$$

En este caso, la relación entre el pago realizado y el excedente se expresaría como

$$p = \frac{\Delta}{2} - (C_A^* - C_A)$$

El Modelo de Interconexión de Nash-Peering podría entenderse erróneamente como un modelo de *peering* pagado, pero hay dos hechos que los diferencian sustancialmente:

- Nash-Peering tiene en cuenta los costes de los operadores que intercambian tráfico, mientras que el *peering* pagado solamente tiene en cuenta el propio flujo de tráfico
- En el *peering* pagado el pago siempre lo realiza quien entrega tráfico al otro operador para que este lo termine en su red. En Nash-Peering quien paga es el operador más beneficiado por la interconexión, con independencia de qué sentido tenga el flujo de tráfico

En el análisis que se ha presentado sólo se considera el flujo de tráfico en una sola dirección (de A a B), pero la realidad nos dice que por una interconexión habitualmente circulan tráficos en ambos sentidos.

Esto no desvirtúa el análisis ni sus conclusiones. Bastaría con aplicar el Modelo de Interconexión de Nash-Peering en ambos sentidos, de forma independiente, para finalmente intercambiar entre los operadores solamente el valor neto resultante de compensar los dos pagos.

Por supuesto, esta compensación no tiene por qué desembocar en un *peering* gratuito (*sf-peering*) ya que para ello los costes en que incurrieran los dos operadores para tratar cada uno de los flujos debería ser equivalentes entre sí y, probablemente, debería ocurrir lo mismo con el volumen de tráfico de cada uno de los flujos en sí mismos.

El caso analizado considera solamente una ruta de las muchas que pueden establecerse entre dos operadores.

Abordar la negociación no considerando las rutas de forma individual, sino como un solo conjunto, desvirtúa el modelo de negociación y puede inducir a tomas de decisiones perjudiciales.

En un conjunto de rutas pueden coexistir unas en que la negociación genere un excedente (Δ) positivo y otras en que se genere un excedente negativo y en las que, por tanto, sea ineficiente la modificación de su situación de interconexión actual. Si aplicamos el modelo a todas ellas como un conjunto, los excedentes de unas y otras se sumarán.

Si el resultado de la suma es un excedente acumulado negativo, la negociación no progresará, perdiéndose la captura de rentabilidad que se hubiera obtenido de haberlo hecho de forma individual solamente en aquellas rutas cuyo excedente era positivo.

Si, caso contrario, el resultado es un excedente acumulado positivo, se progresará hacia una interconexión Nash-Peering en todas las rutas del conjunto, generándose unos beneficios menores que los que se hubieran obtenido de haber progresado solo con las rutas individuales con excedente positivo. Incluir en la negociación las rutas con excedente negativo habrá introducido una penalización sobre el conjunto.

Cierto es que un análisis ruta a ruta puede ser muy complejo, por lo que, como primeros pasos de la negociación, los dos operadores deberán identificar aquellas rutas con costes homogéneos para las dos partes, de forma que haya una generación de excedentes similar para todas ellas, y sí puedan tratarse de forma conjunta. Se enfocaría la negociación sobre grupos de rutas homogéneos, reduciendo el esfuerzo negociador a parámetros razonables.

Este acercamiento se ve reforzado por el hecho de que la mayor parte del tráfico intercambiado suele corresponder a unas pocas rutas, lo que ayudará a poner el foco sobre ellas.

Quizás el aspecto más importante a la hora de abordar un modelo de interconexión Nash-Peering sea la determinación de los costes de los dos operadores y, dado que el modelo es de información completa, el conocimiento que las dos partes deben tener sobre ellos, tanto los propios, como los ajenos.

En cierta medida, se requeriría una cierta confianza entre las partes en negociación, pero la realidad de las negociaciones nacionales e internacionales sobre los intercambios de tráfico no nos hacen ser optimistas sobre este punto.

Como contrapartida, a día de hoy, hay un conocimiento bastante común en la industria acerca de las inversiones necesarias para el despliegue de las redes, los costes de su mantenimiento y los precios del tránsito. En otras palabras: es factible para los operadores estimar los costes del otro jugador a partir de los propios.

Esto, junto con la utilización de herramientas para trazar el camino del tráfico a través de Internet, nos permitirá hacer proyecciones sobre el coste de la otra parte para validar las informaciones recibidas.

3.3 Modelo de costes para la interconexión

Para poder aplicar razonablemente un modelo de interconexión Nash-Peering debemos, en primer lugar, establecer un modelo sencillo para la determinación de costes asociados con cada flujo de tráfico [13].

Desde el punto de vista de un operador, un flujo de tráfico que va desde el punto A, en su propia red, hasta el punto B, en la red de otro operador con quien se está interconectado directamente, transita por dos tramos de red que podemos diferenciar perfectamente (Figura 3-5).

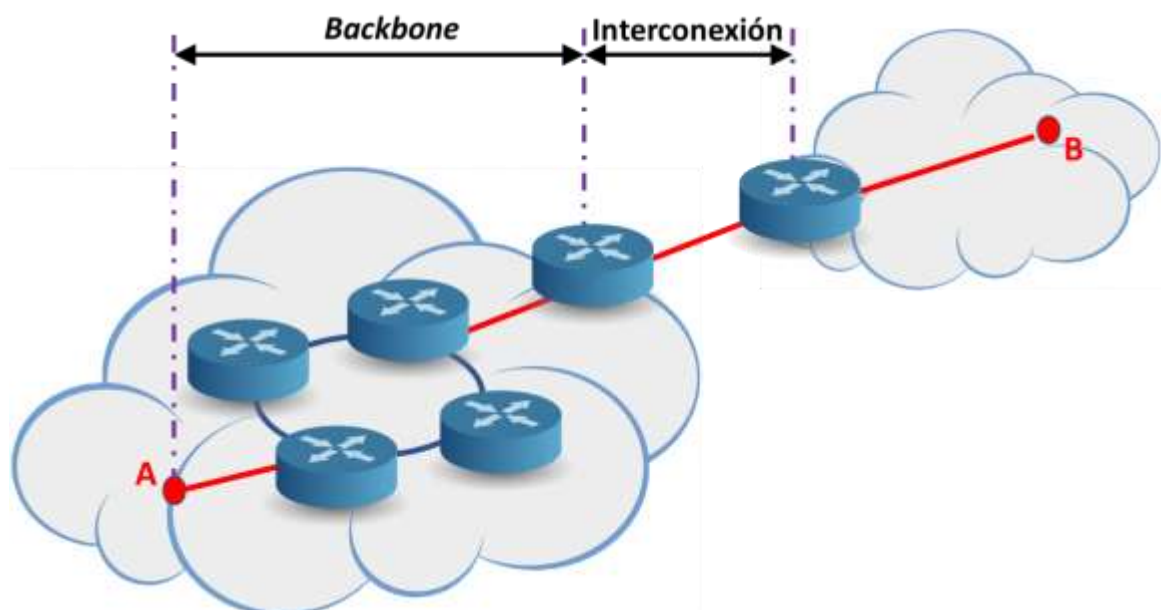


Figura 3-5: Modelo de red con interconexión directa (*peering*)

El primero de ellos es la propia red, el *backbone*: el tramo desde el punto A, donde nace el flujo, hasta el *router* de interconexión.

El segundo la interconexión con la red vecina: el tramo desde que el tráfico está en el *router* de interconexión de la propia red hasta que finaliza en el *router* de interconexión de la otra parte.

A partir de ese punto será el otro operador quien se encargue de la terminación del tráfico en el punto B y quien, por tanto, incurra en sus propios costes, que, de nuevo, tendrán un tramo de *backbone* y otro de interconexión.

Si no hay interconexión directa entre los dos operadores, un flujo de tráfico que va desde el punto A, en su propia red, hasta el punto B, en la red de otro operador, transitará por la red de un tercer operador (Figura 3-6).

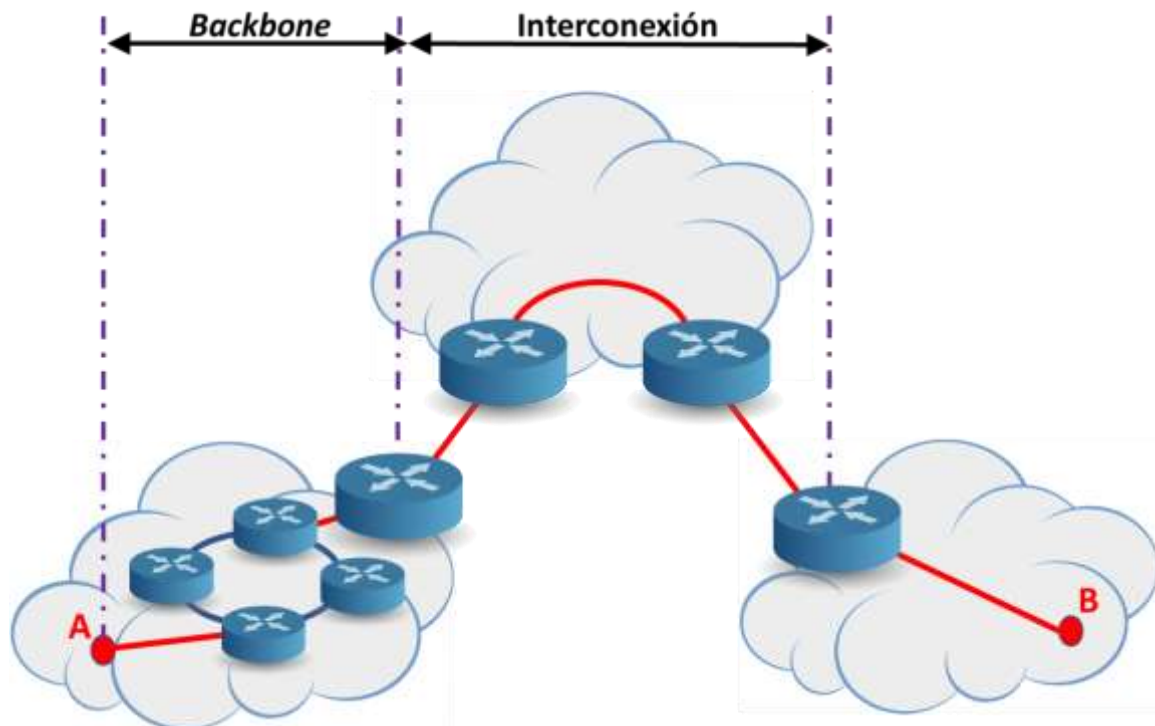


Figura 3-6: Modelo de red con interconexión mediante tránsito

En este caso encontramos los mismos dos tramos diferenciados, uno de *backbone*, coincidente con el de la las redes con interconexión directa, y otro de interconexión que es más amplio que en el caso de interconexión directa porque en la red del operador de tránsito el tráfico recorre un camino entre un *router* de entrada y uno de salida, a través del cual el tráfico se entregará al operador de destino. Este, nuevamente, se encargará de la terminación del tráfico en el punto B y tendrá sus propios tramos de *backbone* y de interconexión.

Así, en una primera estructuración, diferenciaremos los costes de cada operador para encaminar el tráfico de interconexión en:

- costes de *backbone* y
- costes de interconexión

A su vez, en cada uno de esos tramos encontramos costes que son variables en función del tráfico y costes que no lo son y que están asociados con la topología, el funcionamiento y el mantenimiento de la red:

- costes fijos y
- costes variables

Vamos a ver todos ellos desde el punto de vista de cada flujo de tráfico de forma individual, lo que supondrá en algunos casos la identificación de costes perfectamente individualizados y en otros se tratará de imputaciones, normalmente en función de la capacidad global de los elementos de la red implicados en el movimiento del tráfico.

Como formulación global de los costes a considerar tenemos

$$C_f = C_{Ff} + C_{Vf}$$

Donde C_f son los costes asociados al flujo de tráfico bajo estudio, C_{Ff} su componente de costes fijos y C_{Vf} su componente de costes variables.

3.3.1 Costes fijos

Tenemos dos tipos de costes fijos:

– Costes de las conexiones entre elementos de la red IP (circuitos)

Este concepto engloba una cierta diversidad de soluciones para conectar dos puntos de la red, todas ellas compuestas por medios de transmisión y por los dispositivos electrónicos⁸ que permiten la comunicación sobre ellos.

Pueden ser costes de alquiler (OPEX) a un tercero o costes de despliegue (CAPEX⁹). Suelen tener una correlación bastante directa con la distancia entre los puntos conectados.

⁸ Podríamos incluir estos dispositivos electrónicos como otros elementos adicionales de la red, pero se ha preferido incluirlos en el apartado de circuitos porque proporcionan una conectividad asociada a conexiones (~circuitos), mientras que los elementos de la red IP (*routers*) soportan conectividad asociada a paquetes, con una estructura de costes muy diferente entre ellos.

⁹ El CAPEX puede anualizarse en función del tiempo de vida de los activos (T) y de los costes del capital ($WACC$) [31]

$$CAPEX \text{ anualizado} = \sum_j N_j C_j^{CAPEX} \frac{WACC}{1 - (1 + WACC)^{-T}}$$

Igualmente puede calcularse el valor actual del CAPEX en función del $WACC$

$$\text{Valor Actual CAPEX Anualizado}^i = \sum_i^n \frac{CAPEX \text{ Anualizado}^i}{(1 + WACC)^i}$$

donde i es el año. Como ejemplo, puede estimarse un $WACC$ en torno al 8% para los operadores móviles en mercados occidentales

Los medios de transmisión¹⁰ son, fundamentalmente, de cuatro tipos: fibra óptica, cobre¹¹, coaxial¹¹ y “radio”. Los tres primeros llevan asociados los costes de su despliegue y los permisos para poderlo realizarlo. El tercero los costes de las licencias para uso del espectro radioeléctrico.

Los dispositivos electrónicos también son de distintos tipos y con frecuencia se complementan entre ellos: nodos WDM¹², nodos de la red de agregación Ethernet¹³, radioenlaces¹². Incluso pueden no estar presentes cuando se conectan los elementos de la red IP directamente, mediante fibra oscura iluminada por ellos (en estos casos las distancias son limitadas).

Adicionalmente, hay que contabilizar sus costes de operación y mantenimiento (OPEX). Pueden llevarse a cabo con personal propio o estar sujetos a contratos específicos con terceros (incluyendo la reparación de averías) bien tipificados, que permitirán una asociación ágil con los flujos de tráfico analizados.

– Costes de los elementos de la red IP

Routers de borde (*edge*), *core* e interconexión de la red y *switches* asociados.

Su implantación, configuración y evolución están asociadas, habitualmente, a la realización de inversiones (CAPEX)¹³.

También en este caso, hay que contabilizar sus costes de operación y mantenimiento que, igualmente, serán fáciles de identificar y asociar con los flujos analizados porque suelen estar sujetos a contratos con terceros bien tipificados.

Los principales factores que influyen en los costes de operación y mantenimiento son los relacionados con costes laborales y con los costes de la energía y la climatización.

Dado que uno de los principios en que se basan la planificación y construcción de las redes es la eficiencia, los circuitos y elementos de red no suelen estar exclusivamente dedicados a un flujo de tráfico determinado. Esto implica la necesidad de realizar imputaciones de los costes fijos identificados al flujo de tráfico que, en concreto, estemos analizando.

En el análisis de los costes fijos asociados a cada flujo de tráfico (C_{Ff}), a efectos de formalización, abstraemos los costes fijos de *backbone* (C_{Fb}) como los incurridos entre dos puntos de la red p_1 y p_2 y los costes fijos de interconexión (C_{Fi}) como los incurridos entre un punto p de la red y un punto externo a , perteneciente a la red del operador vecino¹⁴.

$$C_{Ff} = C_{Fb}(p_1, p_2) + C_{Fi}(p, a)$$

¹⁰ Los despliegues de medios de transmisión tienen una vida útil de muy larga duración, por lo que el CAPEX asociado, siendo alto, tiene plazos de amortización por encima de los 20 años.

¹¹ En completo retroceso, sustituido por la fibra óptica, ante los incesantes crecimientos de ancho de banda que reclaman las comunicaciones en la actualidad.

¹² Dispositivos con amortizaciones en torno a 10 años.

¹³ En redes IP y Ethernet, suele amortizarse los elementos de red a lo largo de 10 años. Su periodo de renovación tecnológica está entre 5 y 7 años, tras el cual suelen dedicarse a otras funciones menos críticas.

¹⁴ Los costes fijos totales de la red, que no son de aplicación en este Trabajo, se formalizarían como

$$C_F = \sum_{p_1, p_2} C_{Fb}(p_1, p_2) + \sum_{p, a} C_{Fi}(p, a)$$

3.3.2 Costes variables

Son los que están directamente relacionados con el volumen de tráfico o, más habitualmente, con el caudal (*bitrate*).

Los Coste Variables (C_{Vf}) asociados a cada flujo de tráfico (f) tienen tres componentes relacionados con los tramos de red por los que transita el tráfico: la entrada a la red (C_{Ve}), el *backbone* (C_{Vb}) y la salida de la red (C_{Vs})¹⁵.

$$C_{Vf} = C_{Vb}(f) + C_{Ve}(f) + C_{Vs}(f)$$

Desde el punto de vista de un único operador, en una interconexión nunca estarán presentes simultáneamente los costes de entrada y de salida de la red.

Los costes variables de entrada y salida de la red responden a un mismo esquema

$$C_{Ve}(f) = c_{ve}(p, a) \times f + s_{ve}(p) \times f^\alpha$$

$$C_{Vs}(f) = c_{vs}(p, a) \times f + s_{vs}(p) \times f^\alpha$$

$$C_{Vs}(f) = 0, \text{ si } C_{Ve}(f) \neq 0$$

$$C_{Ve}(f) = 0, \text{ si } C_{Vs}(f) \neq 0$$

por lo que podemos tratarlos como un solo concepto, costes variables de interconexión

$$C_{Vi}(f) = c_{vi}(p, a) \times f + s_{vi}(p) \times f^\alpha$$

$$C_{Vf} = C_{Vb}(f) + C_{Vi}(f)$$

donde:

- f representa el volumen de tráfico cursado o su caudal, ancho de banda utilizado para cursarlo, dependiendo de los acuerdos.

Habitualmente los acuerdos de interconexión contemplan que el proveedor cobre por el tráfico según el percentil 95 de los volúmenes que se muestrean en intervalos de cinco minutos. En este caso consideramos, a partir de datos empíricos, que f es función lineal del caudal de tráfico promedio o pico en la interconexión.

- c_{vi} son costes unitarios por volumen o caudal de tráfico, que dependen del PoP (*Point of Presence*, p) y del AS (a) con quien se produzca la interconexión
- las fórmulas $s_{vi}(p) \times f^\alpha$ son una aproximación experimental [13] a un conjunto de costes que tienen una relación escalonada con el tráfico (principalmente puertos, de diferente capacidad)¹⁶ y que dependen exclusivamente del PoP (p).

En una aplicación práctica del modelo de costes hay que validar la utilidad de esta aproximación a cada caso de uso o su sustitución por valores reales tomados de los precios de adquisición de equipos por parte del operador.

¹⁵ Los costes variables totales de la red, que no son de aplicación en este Trabajo, se formalizarían como

$$C_V = \sum_f (C_{Vb}(f) + C_{Ve}(f) + C_{Vs}(f))$$

¹⁶ La determinación experimental del valor de α lo sitúa entre 0,4 y 0,75, tendiendo a 1 para caudales muy altos, uso de muchos puertos de muy alta capacidad y “llenado” cercano al 100%

Los costes variables del *backbone* dependen de los puntos de origen y finalización del tráfico dentro de la red (p_o, p_f) y de la distancia entre ellos. Responden a la siguiente expresión

$$C_{vb}(f) = c_{vb}(p_o, p_f) \times f$$

$$c_{vb}(f) = d(p_o, p_f) \times e(p_o, p_f)$$

donde

- f representa el volumen de tráfico cursado o su caudal (más habitualmente)
- $c_{vb}(p_o, p_f)$ son los costes unitarios por caudal de tráfico
- $d(p_o, p_f)$ es la distancia entre los puntos de origen y finalización del tráfico dentro de la red
- $e(p_o, p_f)$ representa el impacto en los costes del uso de los elementos de la red por los que atraviesa el tráfico

Esta aproximación formal a los costes variables del *backbone* deriva de alguna literatura existente [13], elaborada a partir de análisis experimentales. En una aplicación práctica del modelo de costes hay que validar su utilidad en cada caso de uso o su sustitución por valores reales tomados de los precios de adquisición de equipos por parte del operador y por parámetros de uso actualizados y aterrizados en la red real que se esté analizando.

4 Aplicación del modelo Nash-Peering

En este apartado se describirán algunos casos de uso contruidos a partir de situaciones que se producen en redes reales, con el fin de analizarlos bajo el prisma del modelo de interconexión Nash-Peering y obtener resultados que permitan la valoración del mismo y la obtención de criterios que determinen su nivel de aplicabilidad en redes comerciales.

Antes de abordar los análisis, se presentan algunos datos económicos, precios de equipos y servicios de comunicaciones, con los que concretar el impacto de los resultados obtenidos en ellos.

4.1 Datos económicos para aplicación del modelo

Una vez que se finalice el análisis de cada uno de los casos de uso, que nos proporcionarán una visión válida para situaciones equivalentes a las descritas, aplicaremos los resultados obtenidos a escenarios con valores económicos concretos.

Este apartado recoge un conjunto de precios, fuente para la construcción de esos escenarios, junto con el procedimiento para construirlos a partir de datos de referencia y criterios de aplicación habituales en el mercado español¹⁷.

Duración de los contratos de interconexión

Los contratos de interconexión siempre tienen un carácter de largo plazo, aun cuando es habitual que sufran revisiones anuales.

A efectos de nuestro Trabajo, aplicaremos a los mismos un plazo razonable de 5 años, con foco en el momento actual (sin tener en cuenta posibles revisiones antes de su finalización o condiciones evolutivas a lo largo del tiempo).

Cuando los cálculos económicos de los diferentes escenarios sean recurrentes, se utilizará un criterio sencillo, de forma que todos los conceptos fijos, serán divididos por 60 (=5x12) para contabilizar su repercusión mensual (salvo que dependan de una amortización, en cuyo caso se calculará el valor de la misma en función de los periodos indicados en el apartado 3.3).

Tránsito

Se entiende por caudal IP el ancho de banda IP bidireccional (Gbps) a disposición del operador contratante. El caudal que se contrata es el mayor entre el correspondiente a la entrada (*down*) y la salida (*up*) de la red. Se mide tomando muestras cada 5 minutos y aplicando el percentil 95 (apartado 2.1.4).

La tarificación del servicio se establece en base a tres criterios:

- Alta: se aplica una sola vez cuando se establece la relación entre los operadores; no siempre está presente en todos los contratos.
- Cuota recurrente: precio periódico, anual o mensual, en base a un caudal comprometido, a modo de franquicia.

¹⁷ Disponer de los precios que efectivamente disfrutaban los actores de Internet, en especial los grandes, entraña una gran dificultad, ya que son una palanca fundamental de su estrategia comercial y, como tal, estrictamente confidenciales. Los cálculos llevados a cabo en este apartado nos dan una aproximación a los mismos que nos permitirá una evaluación económica razonable de los escenarios de uso.

- En algún caso se diferencia la cuota por caudal de una cuota por los recursos del punto de interconexión, normalmente cuando se establece en un IXP (*Internet Exchange Point*).
- Excedente de tráfico: precio unitario por Gbps para el tráfico que excede la franquicia en cada periodo de cómputo.
 - A efectos de esta memoria se considerará que el excedente de tráfico se tarificará con el mismo precio unitario medio que el del tráfico incluido en la franquicia, supuesto que se ha alcanzado su máximo caudal¹⁸. No se presentará un valor diferenciado.

El servicio se provee a través del número de interfaces físicas (puertos) que sean necesarios en los nodos del operador que proporciona el tránsito.

Los precios del servicio incluyen el ancho de banda contratado, los puertos para proporcionarlo, la gestión de servicios asociados y el soporte y mantenimiento de todo el entorno.

Los enlaces (circuitos) entre el operador contratante y el operador de tránsito no se incluyen en el servicio y son responsabilidad del primero.

Tránsito nacional¹⁹:

- Alta: 3.000 € (repercusión = 50 €/mes)
- Cuota recurrente IXP: 50 €/mes
- Cuota recurrente caudal:
 - 1 Gbps: 800 €/mes
 - 10 Gbps: 2.000 €/mes

Los unitarios calculados para el tráfico nacional en tránsito a partir de los datos anteriores son:

- Caudal de 1 Gbps: 900 €/Gbps/mes
- Caudal de 10 Gbps: 210 €/Gbps/mes

Tránsito internacional

En interconexiones para grandes caudales (> 500 Gbps), que son con las que trabajaremos en los casos de uso, solamente se está aplicando la cuota recurrente por caudal comprometido:

- Cuota recurrente caudal: 300 €/Gbps/mes

¹⁸ Suele ser un valor habitual en los contratos

¹⁹ Referencia a partir de ofertas realizadas por operadores de tránsito nacionales

Los operadores de tránsito nacional no ofrecen este servicio de forma independiente al internacional, por lo que los precios que se muestran se corresponden con flujos integrados, que lógicamente penalizan al tráfico nacional

Circuitos

En España los circuitos interprovinciales están totalmente liberalizados, mientras que los locales y provinciales están regulados por la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) que fuerza al operador dominante en este mercado a publicar una oferta de referencia, la ORLA (Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas) [37], lo cual no es óbice para que en determinadas geografías también exista competencia en este tipo de líneas, lógicamente, con precios por debajo de la ORLA.

El servicio extremo a extremo definido en la ORLA es el siguiente:

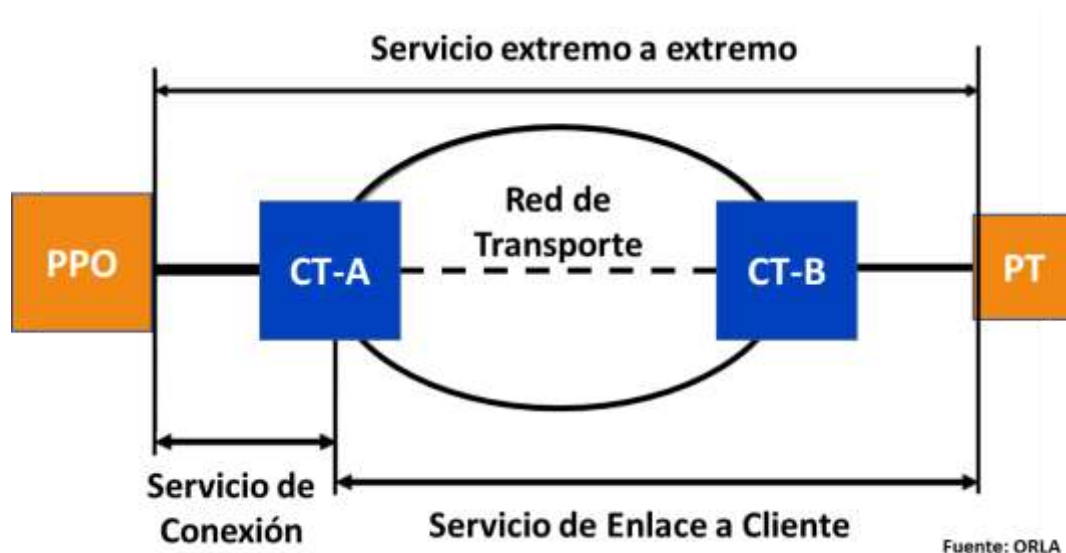


Figura 4-1: Servicio extremo a extremo de líneas alquiladas

donde

- PPO es el Punto de Presencia del operador que alquila la línea
- CT son las Centrales Terminales del operador que suministra las líneas
- PT es el Punto de Terminación de la línea alquilada

Para el caso de alquiler de líneas sobre interfaces Ethernet, que son las que se utilizan en los casos de uso que vamos a analizar, la ORLA ofrece los siguientes precios para un servicio extremo a extremo basado en agregación 10 Gigabit Ethernet²⁰

- Servicio de conexión
 - Alta: 20.217 € (repercusión mensual 336,95 €/mes)
 - Alta agregación circuito: 147 € (repercusión mensual 2,45 €/mes)
 - Cuota anual: 1.679 €/año (repercusión mensual = 139,92 €/mes)
- Servicio de enlace al cliente (función de la distancia²¹) [38]
 - Zona 1 (de 0 a 2 Km)

²⁰ Se aplican precios de terminación mediante uso de arquetas de interconexión, una caja de registro multioperador o espacios de coubicación

²¹ Distancia en línea recta entre las centrales terminales (ver Figura 4-1) expresada en kilómetros

- Alta: 410,09 € (repercusión mensual = 6,83 €/mes)
 - Cuota mensual: 1.239,91 €/mes
- Zona 2 (de 2 a 12 Km)
 - Alta: 800,71 € (repercusión mensual = 13,35 €/mes)
 - Cuota mensual: 1.694,80 €/mes
- Zona 3 (de 12 a 35 Km)
 - Alta: 1.972,58 € (repercusión mensual = 32,88 €/mes)
 - Cuota mensual: 3.059,43 €/mes
- Zona 4 (más de 35 Km)
 - Alta: 1.972,58 € (repercusión mensual = 32,88 €/mes)
 - Cuota mensual: 4.356,98 €/mes

Los costes totales repercutidos mensualmente para una línea 10 Gigabit Ethernet en las distintas zonas será:

- Zona 1 (de 0 a 2 Km): 1.726,06 €/mes
- Zona 2 (de 2 a 12 Km): 2.187,47 €/mes
- Zona 3 (de 12 a 35 Km): 3.571,63 €/mes
- Zona 4 (más de 35 Km): 4.869,18 €/mes

Dada la dificultad que tiene conseguir ofertas comerciales válidas en un mercado tan competido como el de las líneas interprovinciales, donde la aplicación de fuertes descuentos en cada caso distorsiona los valores de referencia, aplicaremos los mismos criterios de ORLA para zona 4, extendiendo su oferta de precios más allá del ámbito provincial²².

Equipos red IP

La referencia más directa para los costes de los *routers* es la Lista General de Precios de uno de los grandes fabricantes, CISCO, que está publicada, junto con la de otros suministradores, en abierto en la Red y accesible a través de distintas webs [39].

Esas listas no pasan de ser una mera referencia, pues los grandes actores de Internet, con quienes los fabricantes mantienen contratos de suministro de gran volumen y largo plazo, tienen descuentos muy elevados sobre los precios de lista. En nuestro análisis aplicaremos una reducción a los precios de lista del 70% para obtener los que se van a utilizar en los cálculos económicos de los casos de uso.

²² El criterio utilizado no responde a la realidad del mercado, pero se ha contrastado que puede servir como una buena aproximación a un valor de referencia

Una configuración de un equipo de gran capacidad como es el ASR 9922 tendría un coste de referencia de [40]^{23, 24,25}

- Router: 195.600 € (repercusión mensual = 1.711,5 €/mes)

A este equipamiento es preciso añadirle las tarjetas de línea que contienen las interfaces físicas (puertos) donde se conectan las líneas de comunicaciones (circuitos).

- Puerto 100 Gigabit Ethernet: 62.700 € (repercusión mensual = 548,63 €/mes)

El coste repercutido por caudal es:

- $k = \frac{\text{coste del puerto}}{100 \text{ Gbps}} = 5,49 \text{ €/Gbps/mes}$

Nodos WDM

Hay que considerar costes de tres tipos de componentes por separado^{23, 26}:

- El equipo principal, que incluye un ROADM (*Reconfigurable Optical Add-drop Multiplexer*), con una segunda vía para redundancia, y la matriz OTN (*Optical Transport Network*)
 - Equipo principal: 61.300 € (repercusión mensual = 536,38 €/mes)
- Los canales ópticos (transponder), incluidas tarjetas de línea, tarjetas de cliente y licencias
 - Canal de 100 Gbps: 32.500 € (repercusión mensual = 284,38 €/mes)
- Amplificadores de señal óptica (OLA), a incorporar en líneas de larga distancia cada 80 Km
 - OLA: 10.500 € (repercusión mensual = 91,88 €/mes)

Fibra oscura

Para la constitución de rutas ópticas se necesitan pares de fibra que, o bien son desplegados por el operador, o son alquilados sin iluminar, para hacerlo con los nodos WDM desplegados.

Lo habitual es alquilar IRUs (*Indefeasible Right of Use*), derechos de uso sobre la fibra, que facilita la compartición de los mazos de fibras entre varios actores, al tiempo que permite contabilizar este coste como CAPEX. Estos derechos suelen contratarse a 15 años o más.

²³ La repercusión mensual incluye un 5% adicional en concepto de costes de mantenimiento

²⁴ Se ha tomado una conversión EUR/ USD de 1€ = \$1,15

²⁵ Aplicando el criterio recogido en la nota al pie nº 13

²⁶ Aplicando el criterio recogido en la nota al pie nº 12

Analizando licitaciones públicas²⁷ podemos obtener un precio medio para los IRUs, contrastable con ofertas comerciales de mercado, con derechos irrevocables a 20 años y con las actividades de conservación y mantenimiento incluidas

- IRU: 325 €/Km/año (repercusión mensual = 27 €/Km/mes)

²⁷ <https://licitacion.red.es/>

4.2 Casos de uso

4.2.1 Interconexión entre dos redes regionales similares en tecnología, arquitectura y tamaño

4.2.1.1 Descripción del caso de uso

Una situación que frecuentemente desemboca en el establecimiento de relaciones de *peering* es la de dos redes regionales, de un tamaño mediano similar, con diseños arquitecturales y tecnológicos equivalentes (en el estándar de la industria), que mantienen flujos de tráfico en tránsito a través de una red nacional con un alcance geográfico más extendido (Figura 4-2).

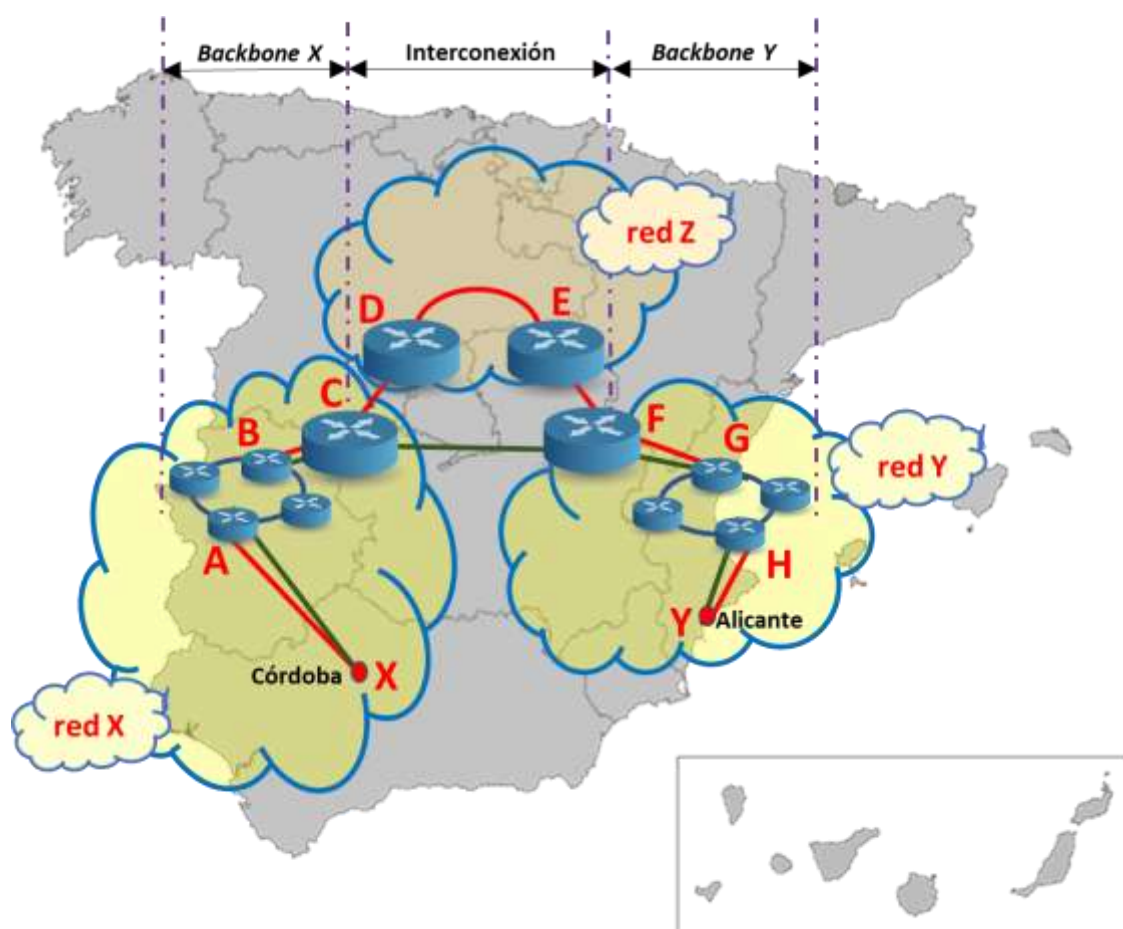


Figura 4-2: Caso de uso 4.2.1: Interconexión entre dos redes regionales similares en tecnología, arquitectura y tamaño

En el caso concreto que vamos a analizar, un operador de Córdoba (X) con una plataforma de contenidos *on-line* intenta extender su mercado de servicios suministrando televisión no lineal a los clientes de un pequeño operador de Alicante (Y), lo que genera un nuevo flujo de tráfico en un punto (X) de la red X con destino a una región (Y) de la red Y que llega a superar los 5 Gbps (f), muy alto frente a la situación anterior, y que mantiene un cierto crecimiento.

La ruta entre estas dos redes estaba siendo anunciada a través de un operador de tránsito nacional (Z) y, de establecerse una relación de *peering*, pasaría a anunciarse a través de una nueva interconexión directa.

Estas nuevas condiciones del tráfico serían el detonante que motivara a X para cambiar a un modelo de interconexión *sf-peering*, con el objetivo de evitar el fuerte incremento en los costes de tráfico, y asegurar la calidad de entrega de los contenidos a los clientes finales.

Sin embargo, para el operador Y no existen tantos incentivos que le muevan al cambio²⁸: el incremento de tráfico y el *peering* gratuito pueden suponerle incremento de costes, y mantener los flujos a través del operador de tránsito le ayudaría a su control dentro de márgenes aceptables y a dar más valor a la relación con este operador, lo que en algún momento puede contribuir a realizar una negociación más favorable de sus tarifas de interconexión (en tránsito).

El nuevo *peering* se establecería entre los mismos PoPs (C y F) en los que en estos momentos está establecida la interconexión con el operador de tránsito. Esto facilitaría no alterar la configuración de los elementos de la red para realizar nuevos encaminamientos y, simplemente, atendiendo al anuncio de la ruta por parte de Y a través del *peering*, con las priorizaciones del protocolo BGP en los *routers* de interconexión, se modificaría el encaminamiento del tráfico.

Las interconexiones con el operador de tránsito (Z) se efectúan en los *routers* de su red (D , E), haciéndose cargo los operadores X e Y de llegar hasta ellos con los medios de comunicación necesarios.

Dado que el interés primario procede del operador X , la interconexión se realizará en el *router* (F) del operador Y , haciéndose cargo X de llegar hasta él con los medios de comunicación necesarios.

El objetivo de nuestro análisis es descubrir en qué casos y bajo qué condiciones sería económicamente rentable a los operadores X e Y interconectarse aplicando un modelo Nash-Peering en la negociación.

4.2.1.2 Aplicación del modelo

Abordamos el análisis identificando en primer lugar los costes involucrados en el análisis.

El punto de amenaza es:

$$\begin{aligned}(u_X^*, u_Y^*) &= (-C_X^*, -C_Y^*) \\ C_X^* &= C_{FX}^* + C_{VX}^* = (C_{FXb}^*(X, C) + C_{FXi}^*(C, AS_Z)) + (C_{VXb}^*(f) + C_{VXi}^*(f)) \\ C_Y^* &= C_{FY}^* + C_{VY}^* = (C_{FYb}^*(Y, F) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) + (C_{VYb}^*(f) + C_{VYi}^*(f))\end{aligned}$$

Y los costes de las redes con interconexión Nash-Peering

$$\begin{aligned}C_X &= C_{FX} + C_{VX} = (C_{FXb}(X, C) + C_{FXi}(C, AS_Y)) + (C_{VXb}(f) + C_{VXi}(f)) \\ C_Y &= C_{FY} + C_{VY} = (C_{FYb}(Y, F) + C_{FYi}(F, AS_X)) + (C_{VYb}(f) + C_{VYi}(f))\end{aligned}$$

El excedente es

$$\Delta = (C_X^* + C_Y^*) - (C_X + C_Y)$$

²⁸ Y podría estar incentivado para proporcionar un estándar alto de calidad en este servicio de contenidos si hubiera una relación comercial entre ambos operadores, por ejemplo, de empaquetamiento de los servicios de X en la oferta de Y a clientes finales, pero los costes incrementales pueden actuar en dirección contraria por el impacto en márgenes.

Vamos tener en cuenta un par de premisas que simplificarán el estudio:

- puesto que los trayectos (*paths*) dentro de las redes X e Y no sufren modificaciones, se mantienen constantes los costes fijos y variables de *backbone* cuando se transita entre el punto de amenaza y la interconexión Nash-Peering

$$C_{FXb}^*(X, C) = C_{FXb}(X, C)$$

$$C_{VXb}^*(f) = C_{VXb}(f)$$

$$C_{FYb}^*(Y, F) = C_{FYb}(Y, F)$$

$$C_{VYb}^*(f) = C_{VYb}(f)$$

- los costes de interconexión de las redes X e Y, que están asociados a puertos y otros elementos con relación escalonada con el tráfico, son los mismos en el tránsito que en el *peering* al depender del mismo PoP y del mismo flujo de tráfico

$$s_{vYi}^*(F) \times f^\alpha = s_{vYi}(F) \times f^\alpha$$

$$s_{vXi}^*(C) \times f^\alpha = s_{vXi}(C) \times f^\alpha$$

lo que nos lleva a

$$\Delta = C_{FXi}^*(C, AS_Z) - C_{FXi}(C, AS_Y) + c_{vXi}^*(C, AS_Z) \times f - c_{vXi}(C, AS_Y) \times f + C_{FYi}^*(F, AS_Z) - C_{FYi}(F, AS_X) + c_{vYi}^*(F, AS_Z) \times f - c_{vYi}(F, AS_X) \times f$$

$$\Delta = [(C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) - (C_{FXi}(C, AS_Y) + C_{FYi}(F, AS_X))] + f \times [c_{vXi}^*(C, AS_Z) - c_{vXi}(C, AS_Y) + c_{vYi}^*(F, AS_Z) - c_{vYi}(F, AS_X)]$$

Como el excedente debe ser positivo ($\Delta > 0$), para que la negociación tenga sentido para los dos jugadores

$$\begin{aligned} & (c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \\ & + \frac{(C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) - (C_{FXi}(C, AS_Y) + C_{FYi}(F, AS_X))}{f} \\ & > c_{vXi}(C, AS_Y) + c_{vYi}(F, AS_X) \end{aligned}$$

Al no variar los elementos de red que intervienen en la interconexión en las redes X e Y (C, F), los costes fijos de interconexión relacionados con ellos tampoco varían, por lo que en la ecuación anterior desaparecen al restarse unos de otros.

Así, los costes fijos de interconexión solamente tendrán relación con costes de circuitos.

Puesto que la interconexión en *peering* se realizará en el *router* (F) del operador Y, el coste de dicho circuito para este será nulo

$$C_{FYi}(F, AS_X) = 0$$

Con lo que la condición que debe cumplirse puede expresarse como

$$(c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \times f + [(C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) - C_{FXi}(C, AS_Y)] > (c_{vXi}(C, AS_Y) + c_{vYi}(F, AS_X)) \times f$$

que viene a decir que los costes del tráfico de interconexión en Nash-Peering deben ser inferiores a los costes del tráfico de interconexión en tránsito más el diferencial de coste de los circuitos.

El pago a realizar entre ambos operadores en Nash-Peering será

$$p = \frac{(C_X^* - C_X) - (C_Y^* - C_Y)}{2}$$

$$p = [(C_{FXb}^*(X, C) + C_{FXi}^*(C, AS_Z)) + (C_{VXb}^*(f) + C_{VXi}^*(f)) - (C_{FXb}(X, C) + C_{FXi}(C, AS_Y)) - (C_{VXb}(f) + C_{VXi}(f)) - (C_{FYb}^*(Y, F) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) - (C_{VYb}^*(f) + C_{VYi}^*(f)) + (C_{FYb}(Y, F) + C_{FYi}(F, AS_X)) + (C_{VYb}(f) + C_{VYi}(f))]/2$$

luego

$$p = \frac{(C_{FXi}^*(C, AS_Z) - C_{FXi}(C, AS_Y) - C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{2} + \frac{[(c_{vXi}^*(C, AS_Z) - c_{vYi}^*(F, AS_Z)) - (c_{vXi}(C, AS_Y) - c_{vYi}(F, AS_X))]}{2} \times f$$

A efectos del cálculo de pagos entre los dos operadores, podemos suponer que los costes unitarios del tráfico de interconexión en Nash-Peering son nulos, quedando subsumida su cuantía en el resultado final del pago a realizar entre ambos (p).

$$c_{vXi}(C, AS_Y) = c_{vYi}(F, AS_X) = 0$$

$$p = \frac{(C_{FXi}^*(C, AS_Z) - C_{FXi}(C, AS_Y) - C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{2} + \left(\frac{f}{2} \times (c_{vXi}^*(C, AS_Z) - c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \right)$$

La condición a cumplir también podría escribirse como

$$\frac{C_{FXi}(C, AS_Y) - (C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{f} < (c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z))$$

4.2.1.3 Análisis de resultados

Las conclusiones del análisis realizado nos indican que la negociación tiene sentido cuando el incremento del coste de los circuitos involucrados en la interconexión es menor que los costes totales del tráfico en tránsito.

$$C_{FXi}(C, AS_Y) - (C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z)) < (c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \times f$$

lo que visto en el modelo de sensibilidad a costes de la Figura 3-3 nos presentaría como justificada la interconexión siempre que los costes de los circuitos para interconectar X e Y (internos) sean menores que la suma de los costes del tráfico en tránsito (externos) más los costes de circuitos para interconectar a ambos con Z (internos).

$$C_{FXi}(C, AS_Y) < ((c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \times f) + (C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z))$$

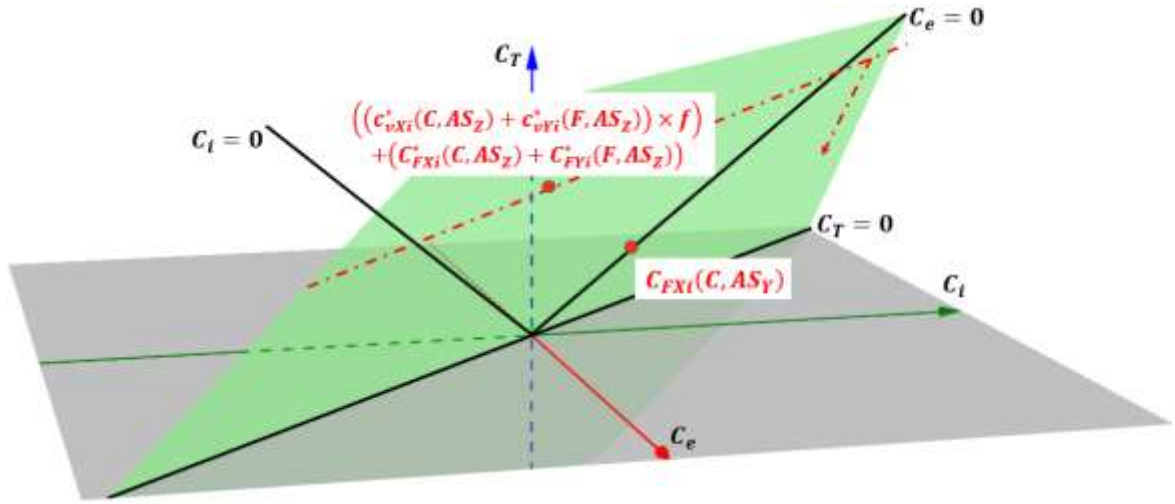


Figura 4-3: Caso de uso 4.2.1: sensibilidad a los costes para obtener excedente (Δ) positivo

El operador de tránsito siempre puede condicionar la nueva relación directa entre los operadores regionales gestionando los costes unitarios del tránsito: en el extremo una reducción agresiva de los mismos podría hacer desaparecer la justificación para una interconexión directa.

El pago a realizar por el operador X al Y (o viceversa) es la mitad del diferencial de coste de los circuitos a utilizar en ambos modos de interconexión más la mitad del diferencial de costes de interconexión del tráfico en tránsito

$$p = \frac{(C_{FXI}^*(C, AS_Z) - C_{FXI}(C, AS_Y) - C_{FYI}^*(F, AS_Z))}{2} + \left(\frac{f}{2} \times (c_{vXi}^*(C, AS_Z) - c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \right)$$

Hay una relación lineal entre el pago a realizar (p) y el balance de costes unitarios de tráfico en tránsito de los dos operadores (Figura 4-4).

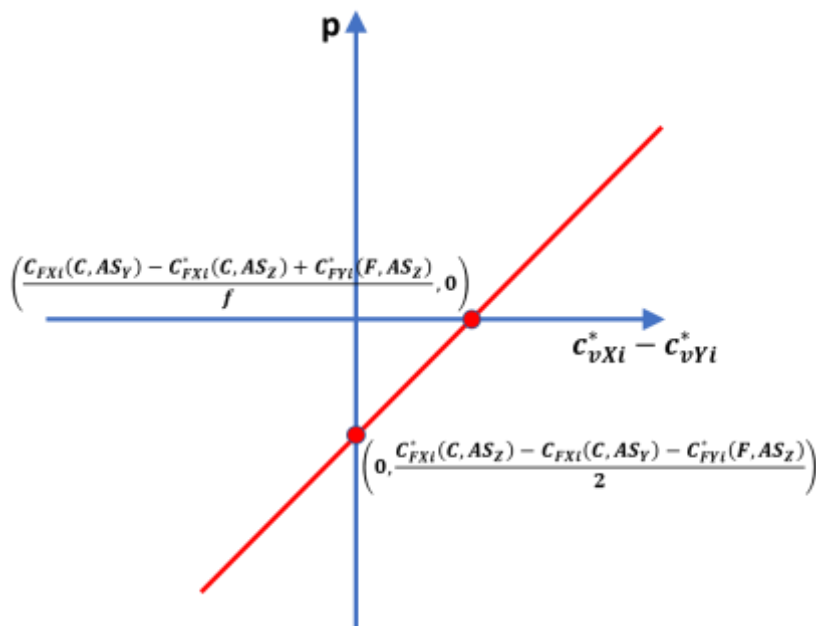


Figura 4-4: Caso de uso 4.2.1: resultado de aplicación de Nash-Peering

4.2.1.4 Impacto económico de los resultados

La primera de las conclusiones del apartado 4.2.1.2 es que la condición para que la negociación tenga sentido en este caso de uso es

$$\frac{C_{FXi}(C, AS_Y) - (C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{f} < (c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z))$$

donde los costes fijos de interconexión solamente tienen relación con el coste de los circuitos involucrados.

Como se ha descrito en 4.1, el impacto de un gran incremento del caudal de tráfico sobre los costes del tránsito nacional va a ser el mismo en los dos operadores, puesto que a uno de ellos le impactará en la salida del tráfico de su red y al otro en la entrada, y siempre se tiene en cuenta el sentido donde el caudal es mayor.

$$c_{vXi}^*(C, AS_Z) = c_{vYi}^*(F, AS_Z) = 210 \text{ €/Gbps/mes}$$

Los circuitos dentro de Córdoba y Alicante son de zona 2 y entre Córdoba y Alicante, son interprovinciales que, como se ha dicho en 4.1, vamos a asimilarlos a zona 4

$$C_{FXi}^*(C, AS_Z) = C_{FYi}^*(F, AS_Z) = 2.187,47 \text{ €/mes}$$

$$C_{FXi}(C, AS_Y) = 4.869,18 \text{ €/mes}$$

Con esos datos los dos lados de la desigualdad tomarían los siguientes valores

$$\frac{C_{FXi}(C, AS_Y) - (C_{FXi}^*(C, AS_Z) + C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{f} = \frac{494,24}{5} = 98,85 \text{ €/Gbps/mes}$$

$$c_{vXi}^*(C, AS_Z) + c_{vYi}^*(F, AS_Z) = 420 \text{ €/Gbps/mes}$$

valores con los que se cumple la desigualdad y se justifica el valor de la negociación.

El precio a pagar entre los operadores es

$$p = \frac{(C_{FXi}^*(C, AS_Z) - C_{FXi}(C, AS_Y) - C_{FYi}^*(F, AS_Z))}{2} + \left(\frac{f}{2} \times (c_{vXi}^*(C, AS_Z) - c_{vYi}^*(F, AS_Z)) \right)$$

$$p = -\frac{4.869,18}{2} = -2.434,59 \text{ €/mes}$$

que es la mitad del coste del circuito que une las redes X e Y, y que, por ser un valor negativo, tal como se ha planteado el análisis debe ser pagado por el operador Y al X.

Aunque en 4.2.1.1 la hipótesis era que X se hacía cargo del coste de los medios de comunicación para establecer la interconexión directa, el resultado del análisis resulta en que los dos operadores se benefician de la misma forma de ella, desde el punto de vista de los costes, por lo que deben compartir los de los circuitos utilizados para establecerla.

En casos como el que nos ocupa, el modelo Nash-Peering nos muestra que un *peering* gratuito beneficia a los dos operadores interconectados procedentes del tránsito, siempre que estén dispuestos a compartir el coste de los circuitos de la interconexión y siempre que el crecimiento del caudal sea tal que haga disminuir significativamente el impacto del coste de dichos circuitos sobre el tráfico.

Esto cambia la perspectiva de las negociaciones actuales, donde, un fuerte incremento del tráfico generado por uno de los operadores, que rompe el equilibrio de tráfico entre los dos interconectados, podría llevar a situaciones de *paid peering* (paga quien genera el tráfico) o, en el caso peor, a un impacto en la calidad percibida por los clientes finales.

Solamente haría revertir la situación, haciendo que la negociación no estuviera justificada, una reducción muy importante de los costes de tránsito (nacional + internacional). En el caso de uso analizado, esa reducción debería superar a corto plazo el 76% ($= 1 - (98,85 \text{ €} / 420 \text{ €})$), lo que lleva a pensar que la solución Nash-Peering tiene mayor recorrido.

4.2.2 Interconexión internacional de un operador nacional convergente

4.2.2.1 Descripción del caso de uso

Un operador nacional convergente en España (T) tiene un tráfico IP internacional de salida de 5 Tbps (f).

Este operador tiene dos puntos de interconexión internacional, uno en Madrid y otro en Barcelona, donde entrega el tráfico en tránsito a dos operadores (X y Y), a cada uno de ellos en ambos PoPs.

El operador Y le propone establecer una nueva interconexión internacional en un PoP que ya tiene establecido en Sevilla (s), en la que le ofertará tarifas de interconexión más ventajosas que las actuales, asegurando el mismo nivel de precios medios unitarios de interconexión por Madrid y Barcelona, aunque disminuya el volumen de tráfico en estos dos PoPs.

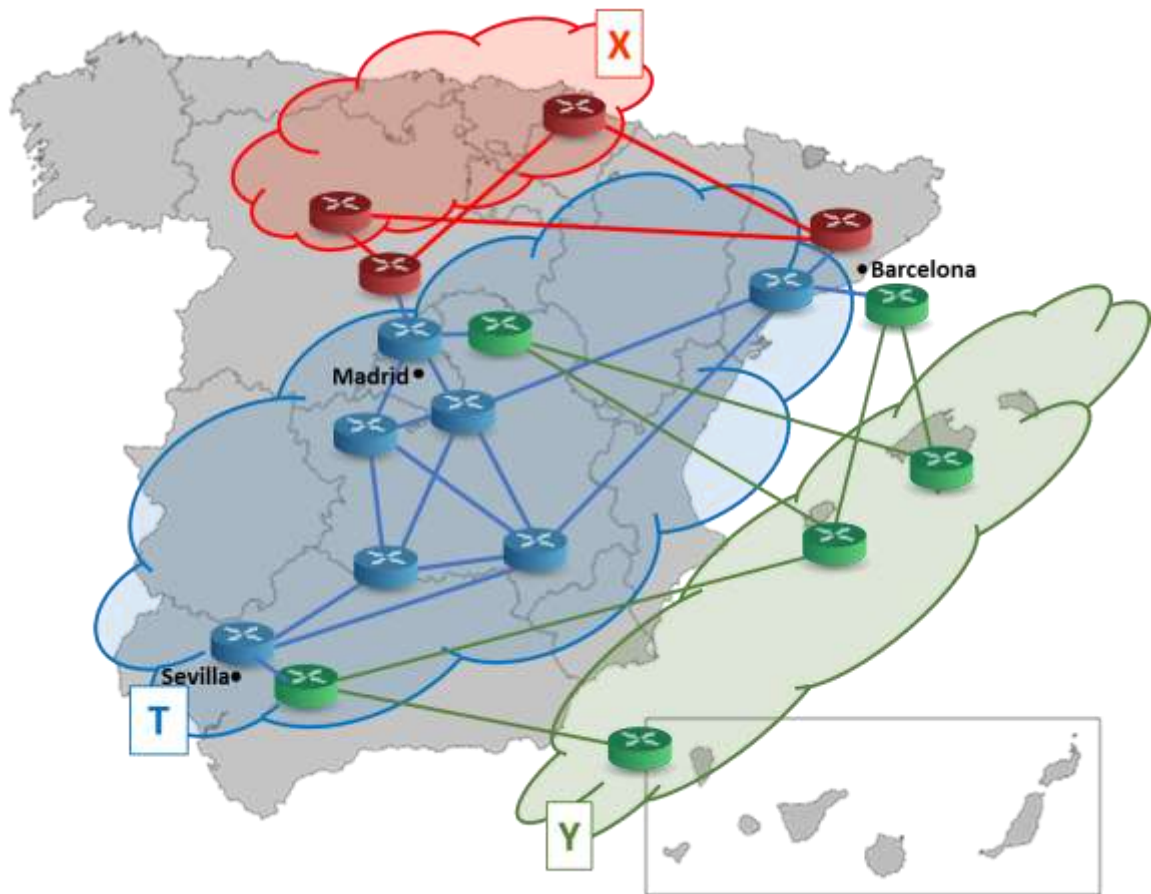


Figura 4-5: Caso de uso 4.2.2: Interconexión internacional de un operador nacional convergente

Aplicando un análisis basado en el modelo Nash-Peering, el objetivo es identificar en qué condiciones será rentable, desde el punto de vista del operador nacional T , la apertura del nuevo punto de interconexión s y cuál será el rebalanceo de tráfico óptimo entre los tres PoPs, en el supuesto de que el volumen de tráfico reencaminado desde las interconexiones de X hacia s no provoca que las tarifas unitarias medias de X incrementen su coste.

4.2.2.2 Aplicación del modelo

Aunque la situación del tráfico no es estática con el tiempo, a efectos del análisis, este se lleva a cabo en el momento (estático) del potencial cambio.

Desde el punto de vista del operador T , el hecho de que haya diferentes PoPs de interconexión antes de analizar el cambio no es relevante, por lo que, a todos los efectos, consideraremos agrupados los flujos de tráfico cursados a través de cada operador (X e Y) en Madrid y en Barcelona.

A efectos de nomenclatura, en todo el análisis de este caso de uso el subíndice M identifica los parámetros del operador Y relacionadas con las rutas de Madrid y Barcelona y el subíndice s los relacionados con la de Sevilla. Los subíndices X e Y , usados de forma aislada, están relacionados con la totalidad de los flujos de tráfico de cada uno de los dos operadores.

De esta manera, los flujos de tráfico involucrados son

$$f = f_X^* + f_Y^*$$

$$f = f_X^* + f_M^* = f_X + f_M + f_s$$

Donde f_X^* y f_X son los flujos de tráfico cursados a través del operador X en Madrid y Barcelona antes y después de la nueva interconexión en Sevilla; f_M^* y f_M son los cursados a través del operador Y en Madrid y Barcelona; y f_s el cursado a través del operador Y en el PoP de Sevilla si se produce la nueva interconexión.

Por tanto, los diferenciales de flujo a cursar en los PoPs de Madrid y Barcelona de los dos operadores X e Y serán

$$\Delta f_X = f_X^* - f_X \quad \text{y} \quad \Delta f_M = f_M^* - f_M$$

y el flujo de tráfico que se acabe cursando a través del PoP de Sevilla será igual a la suma de ambos

$$f_s = \Delta f_M + \Delta f_X$$

Para comenzar se identifican los diferenciales de costes involucrados en el modelo Nash-Peering de los operadores Y y T , que son quienes participan del potencial cambio de interconexión que estamos analizando (el operador X , aunque no está directamente involucrado en el cambio, se verá afectado por la variación en los flujos de tráfico, lo que será resultante del análisis).

Comenzamos por los costes del operador Y

$$C_Y^* - C_Y = (C_{FY}^* - C_{FY}) + (C_{VY}^* - C_{VY})$$

$$= (C_{FYM}^* - C_{FYM} - C_{FYS}) + (C_{VYM}^* - C_{VYM} - C_{VYS})$$

Dado que los PoPs que Y mantiene en Madrid y Barcelona se mantienen, sus costes fijos no variarán

$$C_{FYM}^* = C_{FYM}$$

$$C_Y^* - C_Y = -C_{FYS} + (C_{VYM}^* - C_{VYM} - C_{VYS})$$

Cada uno de los tres costes variables involucrados tiene la siguiente estructura, de acuerdo con lo visto en el apartado 3.3.2

$$C_{Vf} = C_{Vb}(f) + C_{Vi}(f) = [c_{vb}(p_o, p_f) \times f] + [c_{vi}(p, a) \times f + s_{vi}(p) \times f^\alpha]$$

El total de los costes variables del *backbone* ($C_{Vb}(f)$) tiene una dependencia lineal con los flujos de tráfico y con los elementos de red IP (*routers* y *switches*) involucrados en el

encaminamiento del tráfico hacia los PoPs de interconexión. Los flujos de tráfico gestionados en el *backbone* se mantendrán estables antes y después de la interconexión y, dada la arquitectura de esta (ver Figura 4-5), el número de elementos involucrados también permanecerá estable. Por tanto, los costes variables del *backbone* no sufrirán variaciones si se produce el cambio de interconexión analizado²⁹

$$C_{VYMb}^* = C_{VYMb}$$

Respecto de los costes variables de la interconexión, hay un componente ($s_{vi}(p) \times f^\alpha$) que, fundamentalmente, refleja los costes derivados del uso de los puertos en los *routers* de interconexión, y que, de acuerdo con estimaciones experimentales, no dependería linealmente de los flujos de tráfico. Sin embargo, cuando los volúmenes de tráfico son muy altos en comparación con el ancho de banda de los puertos (utilización de muchos puertos, de muy alta capacidad y con un uso, de casi todos los puertos, cercano al 100%), este valor se linealiza ($\alpha \rightarrow 1$) y

$$s_{vi}(p) \times f^\alpha = s_{vi}(p) \times f$$

siendo $s_{vi}(p)$ una constante independiente de los operadores y las rutas e igual

$$s_{vi}(p) = k = \frac{\text{coste de un puerto de alta capacidad (€)}}{\text{capacidad del puerto (Gbps)}}$$

por lo que

$$C_{vi}(f) = (c_{vi}(p, a) + k) \times f$$

donde $c_{vi}(p, a)$ es el coste unitario del tráfico en la interconexión (tránsito internacional)³⁰.

De esta forma,

$$\begin{aligned} C_Y^* - C_Y &= -C_{FYS} + (C_{VYM}^* - C_{VYM} - C_{VYS}) \\ &= -C_{FYS} + (k + c_{vYM}^*) \times f_M^* - (k + c_{vYM}) \times f_M - (k + c_{vYS}) \times f_S \end{aligned}$$

En el caso del operador *Y* los costes variables unitarios de interconexión son nulos puesto que es el operador de tránsito y quien paga por el tránsito es el operador que le entrega el tráfico para encaminamiento internacional, no él

$$c_{vYM}^* = c_{vYM} = c_{vYS} = 0$$

y

$$\begin{aligned} C_Y^* - C_Y &= -C_{FYS} + k \times f_M^* - k \times f_M - k \times f_S = -C_{FYS} + k(f_M^* - f_M) - k \times f_S \\ C_Y^* - C_Y &= -C_{FYS} + k \times \Delta f_M - k \times f_S = -C_{FYS} + k \times (\Delta f_M - f_S) \\ C_Y^* - C_Y &= -C_{FYS} - k \times \Delta f_X \end{aligned}$$

²⁹ No se ha considerado como costes variables de *backbone* los que pueda tener el operador *Y* por encaminar el tráfico recogido en los PoPs hacia los operadores donde ha de terminarlo haciendo uso de redes internacionales, propias o ajenas. Es muy complejo conocer cuales pudieran ser estos costes ya que dependen de negociaciones confidenciales globales del operador internacional. Al estar haciendo el análisis desde el punto de vista del operador nacional, se ha preferido considerar, de forma indiferenciada, que esos costes forman parte del precio que le traslada el operador internacional por el tráfico en la interconexión.

³⁰ Para simplificar el análisis, a partir de aquí, en lugar de usar la nomenclatura $c_{vi}(p, a)$ para este coste unitario, donde p representa el PoP de la interconexión y a el AS vecino, usaremos c_r , donde r identifica a la ruta de interconexión: c_{vYS} para los costes unitarios del tráfico en la ruta de Sevilla y c_{vYM} para las rutas de Madrid y Barcelona.

Ahora abordaremos los costes del operador T .

Aunque el operador X no esté involucrado directamente en el cambio, desde el punto de vista de T hay que incluir los costes de las rutas que tiene establecidas con él (TX), además de los de las rutas establecidas con Y (TM y TS), puesto que forman parte de su entorno global de interconexión internacional y pueden variar con el cambio

$$C_T^* - C_T = (C_{FTX}^* + C_{FTM}^* - C_{FTX} - C_{FTM} - C_{FTS}) \\ + (C_{vTX}^* + C_{vTM}^* - C_{vTX} - C_{vTM} - C_{vTS})$$

Al igual que en el caso del operador Y , al mantener X y T sus PoPs en Madrid y Barcelona, sus costes fijos no variarán

$$C_{FTX}^* = C_{FTX}$$

$$C_{FTM}^* = C_{FTM}$$

y

$$C_T^* - C_T = (-C_{FTS}) + (C_{vTX}^* + C_{vTM}^* - C_{vTX} - C_{vTM} - C_{vTS})$$

Siguiendo el mismo análisis que hacíamos antes para el operador Y

$$C_{Vi}(f) = (c_{vi}(p, a) + k) \times f$$

$$C_T^* - C_T = (-C_{FTS}) \\ + ((k + c_{vTX}^*) \times f_X^* + (k + c_{vTM}^*) \times f_M^* - (k + c_{vTX}) \times f_X \\ - (k + c_{vTM}) \times f_M - (k + c_{vTS}) \times f_S)$$

y considerando que los costes unitarios medios del tráfico de interconexión en las rutas de Madrid y Barcelona no van a variar

$$c_{vTM}^* = c_{vTM}$$

$$c_{vTX}^* = c_{vTX}$$

$$C_T^* - C_T = (-C_{FTS}) \\ + ((k + c_{vTX}) \times (f_X^* - f_X) + (k + c_{vTM}) \times (f_M^* - f_M) - (k + c_{vTS}) \times f_S) \\ = (-C_{FTS}) + (k + c_{vTX}) \times \Delta f_X + (k + c_{vTM}) \times \Delta f_M - (k + c_{vTS}) \times f_S \\ = (-C_{FTS}) + (k + c_{vTX}) \times \Delta f_X + (k + c_{vTM}) \times (f_S - \Delta f_X) \\ - (k + c_{vTS}) \times f_S$$

$$C_T^* - C_T = -C_{FTS} + c_{vTX} \times \Delta f_X + c_{vTM} \times (f_S - \Delta f_X) - c_{vTS} \times f_S$$

$$C_T^* - C_T = -C_{FTS} + (c_{vTX} - c_{vTM}) \times \Delta f_X + (c_{vTM} - c_{vTS}) \times f_S$$

Una vez que conocemos los diferenciales de costes de los dos operadores involucrados en la nueva interconexión, podemos calcular el excedente de la negociación según criterios Nash-Peering

$$\Delta = (C_Y^* + C_T^*) - (C_Y + C_T)$$

$$\Delta = (C_Y^* - C_Y) + (C_T^* - C_T)$$

$$\Delta = -(C_{FYS} + C_{FTS}) - k \times \Delta f_X + (c_{vTX} - c_{vTM}) \times \Delta f_X + (c_{vTM} - c_{vTS}) \times f_S$$

Para que la negociación tenga sentido, económicamente hablando, el excedente tiene que ser positivo

$$\Delta > 0$$

$$[-(C_{FYS} + C_{FTS}) - k \times \Delta f_X + (c_{vTX} - c_{vTM}) \times \Delta f_X + (c_{vTM} - c_{vTS}) \times f_s] > 0$$

$$\Delta c_{vTSM} > \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right] + \left[\frac{k - (c_{vTX} - c_{vTM})}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

Donde $\Delta c_{vTSM} = c_{vTM} - c_{vTS}$ son los mayores costes unitarios que soporta T entre cursar el tráfico por las rutas de Madrid y Barcelona del operador Y frente a la nueva ruta de Sevilla.

Finalmente, calculamos el pago que tendrán que hacerse T e Y entre sí

$$p = \frac{(C_Y^* - C_Y) - (C_T^* - C_T)}{2}$$

$$p = \frac{-C_{FYS} - k \times \Delta f_X + C_{FTS} - (c_{vTX} - c_{vTM}) \times \Delta f_X - (c_{vTM} - c_{vTS}) \times f_s}{2}$$

$$p = \frac{(C_{FTS} - C_{FYS}) - (k + (c_{vTX} - c_{vTM})) \times \Delta f_X - \Delta c_{vTSM} \times f_s}{2}$$

$$p = \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{2} \right] - \left[\frac{k + (c_{vTX} - c_{vTM})}{2} \right] \Delta f_X - \left[\frac{f_s}{2} \right] \Delta c_{vTSM}$$

4.2.2.3 Análisis de resultados

Del análisis llevado a cabo en el apartado anterior concluimos que la reducción de costes unitarios por la ruta de Sevilla frente a las de Madrid y Barcelona del operador Y debe ser mayor que el peso los costes fijos sobre el flujo total cursado por la nueva ruta, más el impacto económico del movimiento de tráfico desde las rutas del operador X a la de Sevilla, sobre el total cursado por esta ruta

$$\Delta c_{vTSM} > \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right] + \left[\frac{k - (c_{vTX} - c_{vTM})}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

lo que visto en el modelo de sensibilidad a costes de la Figura 3-3 nos presentaría como justificada la interconexión siempre que la suma de los costes de cursar el tráfico por Sevilla (externos), más el diferencial entre los costes de los circuitos para llegar a ese PoP, menos los costes de puertos del operador Y para cursar el tráfico derivado de las rutas de X a la de Sevilla (internos), sea menor que los costes de llevar ese mismo tráfico por las rutas de Madrid y Barcelona de X e Y (externos).

$$(c_{vTS} \times f_s) + (C_{FYS} + C_{FTS} - k \times \Delta f_X) < (c_{vTM} \times (f_s - \Delta f_X)) + (c_{vTX} \times \Delta f_X)$$

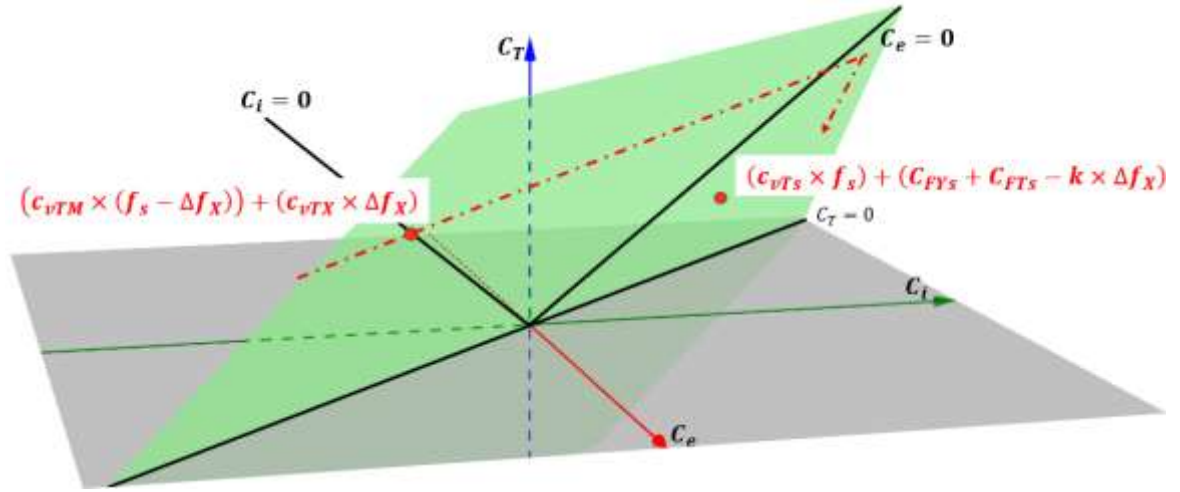


Figura 4-6: Caso de uso 4.2.2: sensibilidad a los costes para obtener excedente (Δ) positivo

El pago a realizar por el operador Y a T dependerá del diferencial de costes fijos entre los operadores que se interconectan en Sevilla; del impacto económico del movimiento de tráfico desde las rutas del operador X a la de Sevilla; y del ahorro de cursar el flujo de tráfico previsto por la ruta de Sevilla frente a hacerlo por las rutas de Madrid y Barcelona del operador Y

$$p = \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{2} \right] - \left[\frac{k + (c_{vTX} - c_{vTM})}{2} \right] \Delta f_X - \left[\frac{f_s}{2} \right] \Delta c_{vTSM}$$

En la realidad, como difícilmente se producirá un pago *one-shot* entre operadores en una negociación Nash-Peering de estas características, debemos buscar las condiciones para que este pago se reduzca a cero. En otras palabras: hay que buscar una disminución de los costes unitarios del tráfico por la ruta de Sevilla tal que $p \leq 0$ para que la negociación tenga un resultado interesante para T^{31} .

$$\begin{aligned} \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{2} \right] - \left[\frac{k + (c_{vTX} - c_{vTM})}{2} \right] \Delta f_X - \left[\frac{f_s}{2} \right] \Delta c_{vTSM} &\leq 0 \\ \Delta c_{vTSM} &\geq \frac{(C_{FTS} - C_{FYS}) - (k + (c_{vTX} - c_{vTM})) \times \Delta f_X}{f_s} \\ \Delta c_{vTSM} &\geq \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{f_s} \right] - \left[\frac{(k + (c_{vTX} - c_{vTM}))}{f_s} \right] \times \Delta f_X \end{aligned}$$

Como caso particular que ayude a entender mejor el resultado obtenido, veamos aquel en que los costes unitarios medios de las rutas de Madrid y Barcelona de los dos operadores internacionales fuesen iguales³²,

³¹ Si p fuese negativo, del modelo Nash-Peering se concluye que debería ser T quien realice el pago a Y . En la realidad este pago no se realizaría y habría que verlo como un incentivo adicional para T para establecer la nueva interconexión.

³² A efectos de un Trabajo de carácter público y abierto, como es este, es imposible conocer de los operadores los costes unitarios reales de sus interconexiones internacionales, dado el valor estratégico de las mismas. Por tanto, una aproximación como la este caso particular, además del valor demostrativo, es una aproximación bastante realista cuando estamos tratando de grandes flujos de tráfico con un *mix* de destinos muy variado, como es el caso.

$$\Delta c_{vTSM} > \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right] + \left[\frac{k}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

$$p = \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{2} \right] - \left[\frac{k}{2} \right] \Delta f_X - \left[\frac{f_s}{2} \right] \Delta c_{vTSM}$$

En esta situación el pago se reduce a la mitad del diferencial de costes fijos incurrido, menos la mitad del coste de los puertos incrementales de Y para cursar el tráfico de X derivado a Sevilla, menos la mitad de los ahorros por cursar el tráfico por la ruta de Sevilla, en lugar de por las de Madrid y Barcelona del operador Y.

Y para que $p \leq 0$, el ahorro de costes unitarios por la ruta de Sevilla debe ser

$$\Delta c_{vTSM} \geq \left[\frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{f_s} \right] - \left[\frac{k}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

Condición que siempre se cumple, como podemos ver en la Figura 4-7, cuando se ha cumplido la condición que justifica la negociación (derivada de $\Delta > 0$) y teniendo en cuenta que Δf_X siempre será mayor o igual que 0.

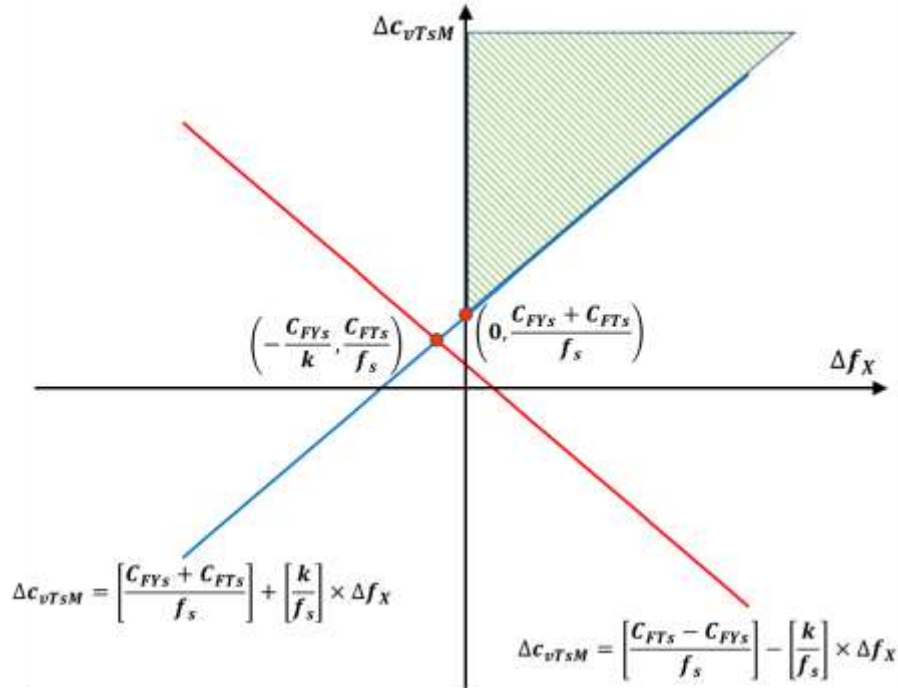


Figura 4-7: Caso de uso 4.2.2: resultado de aplicación de Nash-Peering

Lógicamente, dado que hay una reducción del precio del tráfico por parte de Y, este efecto debe reflejarse en una “penalización” económica para él ($p \leq 0$), que en un escenario como el caso de uso que estamos analizando no se verá compensada por T: es su incentivo para cambiar el encaminamiento y para afrontar su continuo crecimiento de tráfico ($\approx 20-30\%$, ver Figura 2-7).

También la Figura 4-7 muestra que, en el caso peor para Y, en que todo el tráfico de Sevilla procede de sus rutas de Madrid y Barcelona, la reducción de costes unitarios por la ruta de Sevilla debe ser

$$\Delta c_{vTSM} = \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right]$$

y este valor debe incrementarse en función del tráfico que migre a Sevilla desde las rutas del operador X

4.2.2.4 Impacto económico de los resultados

En el apartado 4.2.2.2 se concluye que la condición para que la negociación tenga sentido en este caso de uso es

$$\Delta c_{vTSM} > \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right] + \left[\frac{k - (c_{vTX} - c_{vTM})}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

En 4.2.2.3 ya hemos identificado que, con la información de mercado disponible, es razonable que los costes unitarios medios de las rutas de Madrid y Barcelona de los dos operadores internacionales sean iguales

$$\Delta c_{vTSM} > \left[\frac{C_{FYS} + C_{FTS}}{f_s} \right] + \left[\frac{k}{f_s} \right] \times \Delta f_X$$

T tendrá que desplegar un nuevo *router* de interconexión en Sevilla y establecer nuevos circuitos para conectarlo con el PoP que Y tiene en la misma ciudad³³. Ambos operadores, además, deben establecer nuevos circuitos sobre las dos rutas que unen sus PoPs con sus propios *backbones* (ver Figura 4-5).

Aunque, a priori, no sabemos el caudal necesario porque aún no hemos determinado el volumen a intercambiar, todos los circuitos se calcularán con una capacidad máxima agregada de 1 Tbps.

Para realizar la ampliación de las 2 rutas del *backbone* con Sevilla, se añadirán a los dos nodos WDM extremos de cada una de ellas, 10 canales ópticos de 100 Gbps. Los costes asociados serán (ver apartado 4.1),

$$C_{FTsb} = C_{FYSb} = 2 \times (2 \times 10 \times 284,38) = 11.375,2 \text{ €/mes}$$

En el caso de los circuitos para unión entre PoPs, utilizaremos dos nuevos pares de fibra oscura locales (≤ 10 Km) iluminada con 2 nodos WDM, uno en cada extremo de las fibras, con conmutación entre los trayectos de fibra para tener recuperación automática de la comunicación en caso de corte.

Los costes fijos de interconexión de cada operador, incluyendo nodo IP y circuitos de unión entre PoPs es

$$C_{FYSi} = 0 \text{ €/mes}$$

$$C_{FTSi} = 1.711,5 + (2 \times 10 \times 27) + 2 \times (536,38 + (10 \times 284,38)) = 9.011,86 \text{ €/mes}$$

$$C_{FTS} = C_{FTsb} + C_{FTSi} = 20.387,06 \text{ €/mes}$$

$$C_{FYS} = C_{FYSb} + C_{FYSi} = 11.375,2 \text{ €/mes}$$

En el caso más exigente para la inecuación, en que $\Delta f_X = f_s$ (todo el tráfico de Sevilla procede del operado X)

³³ Los costes incrementales asociados a los puertos necesarios para equipar los *routers* de los PoPs y aquellos con quienes se conectan dentro de cada red, se recogen en los costes variables de interconexión y de *backbone* y están expresados en función del tráfico incremental total que cursa cada operador: 0 en el caso de T y Δf_X en el caso de Y

$$\Delta c_{vTSM} > \left\lceil \frac{31.762,26}{f_s} \right\rceil + 5,49$$

Veamos en un par de escenarios, en función de la reducción tarifaria ofertada por cursar el tráfico a través de la ruta de Sevilla, cuál sería el flujo de tráfico mínimo necesario para que la inecuación fuese cierta y que la negociación estuviera justificada.

- a) La oferta de reducción tarifaria por la ruta de Sevilla es del 20%

$$f_s > \frac{31.762,26}{300 \times 0,2 - 5,49}$$

$$f_s > 582,69 \text{ Gbp}$$

11,7% del tráfico total de la interconexión internacional

- b) La oferta de reducción tarifaria por la ruta de Sevilla es del 30%

$$f_s > \frac{31.762,26}{300 \times 0,3 - 5,49}$$

$$f_s > 375,84 \text{ Gbps}$$

7,5% del tráfico total de la interconexión internacional

Ambas desigualdades nos muestran que para que T pueda considerar razonable establecer una nueva interconexión internacional en Sevilla, los costes de establecimiento deben ser compensados por una reducción en los costes del tráfico, que son dependientes del descuento unitario que le ofrezca Y por la nueva ruta (Δc_{vTSM}) y el caudal mínimo cursado por la misma (f_s). Y, evidentemente, cuanto mayor es la reducción tarifaria, menor es el tráfico mínimo necesario para hacer viable la nueva interconexión.

El pago p toma los siguientes valores en ambos escenarios, cursándose el tráfico mínimo que los justifica:

$$p = \left\lceil \frac{C_{FTS} - C_{FYS}}{2} \right\rceil - \left\lceil \frac{k}{2} \right\rceil \Delta f_X - \left\lceil \frac{f_s}{2} \right\rceil \Delta c_{vTSM}$$

- a)

$$p = \left\lceil \frac{9.011,86}{2} \right\rceil - \left\lceil \frac{5,49}{2} \right\rceil \times 582,69 - \left\lceil \frac{582,69}{2} \right\rceil \times 300 \times 0,2$$

$$p = -14.574,25 \text{ €/mes}$$

- b)

$$p = \left\lceil \frac{9.011,86}{2} \right\rceil - \left\lceil \frac{5,49}{2} \right\rceil \times 375,84 - \left\lceil \frac{375,84}{2} \right\rceil \times 300 \times 0,3$$

$$p = -13.438,55 \text{ €/mes}$$

En el apartado 4.2.3.3 ya se ha explicado que los valores negativos de p no implican, en este caso, un pago a Y por parte de T , sino que se convierten en incentivos para que este último establezca el nuevo punto de interconexión.

Dado que en el segundo escenario (reducción tarifaria del 30%) p es mayor (valor absoluto negativo inferior), podría parecer que los incentivos de T son menores cuanto mayor es el descuento por el tráfico cursado por la nueva ruta, pero, lógicamente, no es así. Los valores

obtenidos están referidos a los caudales mínimos a partir de los cuales la modificación del encaminamiento es beneficiosa para T . Bastará con que el tráfico cursado en los dos escenarios sea el mismo para que el escenario de mayor descuento presente un p menor ($-23.314,60 \text{ €/mes}$), correspondiéndose con unos incentivos mayores para T .

Con visión de futuro, pensando en que el tráfico cursado por T crece progresivamente año a año ($\approx 20\text{-}30\%$, Figura 2-7), la apertura de la nueva ruta le permite disponer de una vía para compensar el crecimiento de los costes del tráfico internacional asociados a este incremento paulatino de caudal.

Desde el punto de vista del operador de tráfico internacional, podría pensarse que Y estaría tentado de limitar los caudales de tráfico cursados con reducción tarifaria, pero no es una situación plausible: las reducciones tarifarias, en el fondo, suelen ser anticipos a la tendencia de disminución progresiva de precios del tránsito internacional (ver Figura 2-8), con lo que la reducción acabará produciéndose por sí misma para el total del tráfico, haciendo que las limitaciones a corto plazo carezcan de sentido (salvo por capacidad de red disponible, por supuesto).

4.2.3 Interconexión internacional de un operador móvil nacional

4.2.3.1 Descripción del caso de uso

Los operadores móviles, por la propia especificidad de sus redes y terminales, lo que los lleva a limitar los volúmenes de tráfico cursado³⁴, presentan flujos en interconexión muy inferiores a los de los operadores fijos, sobre todo cuando estos proporcionan de forma masiva accesos de banda ultra ancha (FTTH, DOCSIS 3.1).

Así, dado que las tarifas de tránsito internacional suelen tener una estructura escalonada, los precios unitarios pagados por los operadores móviles son superiores a los pagados por los operadores fijos.

La alternativa es sumar su tráfico al de un operador convergente nacional, accediendo a tarifas menores en el tránsito internacional, pero soportando un coste incremental derivado del tránsito nacional a través de este operador.

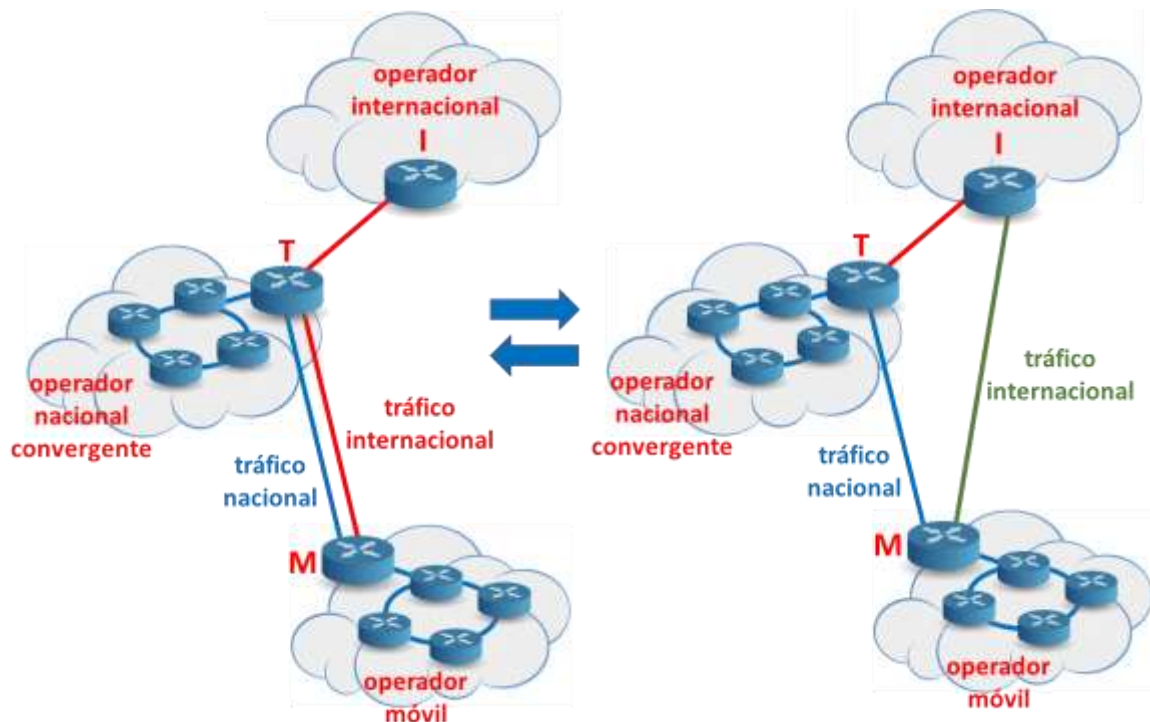


Figura 4-8: Caso de uso 4.2.3: Interconexión internacional de un operador móvil nacional

De cara al análisis asimilaremos a un *peering* la relación con el operador internacional, puesto que la función de tránsito que este realiza queda fuera del mismo: solo nos interesa la función de tránsito que lleva a cabo el operador convergente nacional.

En este caso de uso buscamos encontrar el punto de inflexión que haga más rentable para el operador móvil un modelo de encaminamiento frente al otro.

Tomaremos como referencia un operador móvil nacional (M) con tráfico internacional (f) de 0,5 Tbps.

³⁴ En el mercado de móviles español empiezan a aparecer tarifas planas de datos ilimitadas (o casi). El impacto de las mismas en el tráfico global es muy restringido porque suelen ser caras y estar reservadas para clientes de alto valor y, normalmente, en convergencia con servicios fijos de acceso mediante fibra FTTH o cable HFC DOCSIS 3.1.

Supondremos que la interconexión, en ambos escenarios, se realiza en un solo PoP de cada operador. Por seguridad, al menos, actualmente se está realizando en dos o más de dos, pero, a todos los efectos, este análisis es independiente de este número.

Los PoPs involucrados en los dos escenarios son los mismos: no hay cambios geográficos que puedan impactar en el encaminamiento del flujo de tráfico, lo que distorsionaría el análisis. Esto facilita, además, no alterar la configuración de los elementos de la red para realizar nuevos encaminamientos, bastará con atender a qué AS vecino anuncia las rutas internacionales deseadas en cada situación.

Las interconexiones con el operador de tránsito internacional se efectúan en un *router* de su red (I), haciéndose cargo los operadores M y T de llegar hasta él con los medios de comunicación necesarios. En otras palabras: I no estará involucrado en las decisiones de M de cambiar el encaminamiento de su flujo de tráfico (que, por uno u otro camino, siempre acabará en la red de I).

La interconexión nacional se realiza en un *router* del operador T , haciéndose cargo M de llegar hasta él con los medios de comunicación necesarios.

Los PoPs de M y T están coubicados, no así el PoP de I .

4.2.3.2 Aplicación del modelo

Los costes de las redes en los dos escenarios analizados son

$$C_M^* = C_{FM}^* + C_{VM}^* = (C_{FMb}^* + C_{FMi}^*(M, AS_T)) + (C_{VMb}^*(f) + C_{VMi}^*(f))$$

$$C_I^* = C_{FI}^* + C_{VI}^* = (C_{FIb}^* + C_{FIi}^*(I, AS_T)) + (C_{VIb}^*(f) + C_{VIi}^*(f))$$

$$C_M = C_{FM} + C_{VM} = (C_{FMb} + C_{FMi}(M, AS_I)) + (C_{VMb}(f) + C_{VMi}(f))$$

$$C_I = C_{FI} + C_{VI} = (C_{FIb} + C_{FIi}(I, AS_M)) + (C_{VIb}(f) + C_{VIi}(f))$$

Dado que el flujo de tráfico a encaminar y los PoPs de I y de M no cambian, los costes fijos y variables del *backbone* tampoco lo hacen

$$C_{FMb}^* = C_{FMb}$$

$$C_{FIb}^* = C_{FIb}$$

$$C_{VMb}^*(f) = C_{VMb}(f)$$

$$C_{VIb}^*(f) = C_{VIb}(f)$$

y los costes de interconexión de las redes M e I , que están asociados a puertos y otros elementos con relación escalonada con el tráfico, son también los mismos en los dos escenarios

$$s_{vMi}^*(M) \times f^\alpha = s_{vMi}(M) \times f^\alpha$$

$$s_{vIi}^*(I) \times f^\alpha = s_{vIi}(I) \times f^\alpha$$

Por tanto, el excedente es

$$\Delta = (C_M^* + C_I^*) - (C_M + C_I) = (C_M^* - C_M) + (C_I^* - C_I)$$

$$\Delta = C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I) + c_{vMi}^*(M, AS_T) \times f - c_{vMi}(M, AS_I) \times f \\ + C_{FIi}^*(I, AS_T) - C_{FIi}(I, AS_M) + c_{vIi}^*(I, AS_T) \times f - c_{vIi}(I, AS_M) \times f$$

El operador I no soporta costes variables de interconexión en ninguno de los dos escenarios ya que es el operador de tránsito internacional y es a él a quien le pagan los otros operadores por encaminar el tráfico

$$c_{vIi}^*(I, AS_T) = c_{vIi}(I, AS_M) = 0$$

por lo que

$$\Delta = C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I) + c_{vMi}^*(M, AS_T) \times f - c_{vMi}(M, AS_I) \times f + C_{FIi}^*(I, AS_T) - C_{FIi}(I, AS_M)$$

$$\Delta = (C_{FMi}^*(M, AS_T) + C_{FIi}^*(I, AS_T)) - (C_{FMi}(M, AS_I) + C_{FIi}(I, AS_M)) + f \times \Delta c_{vMi}$$

donde Δc_{vMi} es el incremental de costes unitarios de interconexión pagados por M cuando se conecta al operador convergente nacional (que hará un tránsito del tráfico) frente a conectarse directamente con el operador internacional

$$\Delta c_{vMi} = c_{vMi}^*(M, AS_T) - c_{vMi}(M, AS_I)$$

Asumiendo que los circuitos necesarios para conexión con el PoP internacional corren por cuenta de los operadores nacionales que se interconectan al mismo, los costes fijos de interconexión restantes del operador internacional estarán asociados al propio PoP y serán los mismos se interconecte un operador u otro

$$C_{FIi}^*(I, AS_T) = C_{FIi}(I, AS_M)$$

y

$$\Delta = (C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I)) + f \times \Delta c_{vMi}$$

Dado que, para que la negociación tenga sentido, el excedente debe ser positivo

$$\Delta = (C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I)) + f \times \Delta c_{vMi} > 0$$

$$\Delta c_{vMi} > \frac{C_{FMi}(M, AS_I) - C_{FMi}^*(M, AS_T)}{f}$$

Calculamos el pago que tendrán que hacerse M e I entre sí

$$p = \frac{(C_M^* - C_M) - (C_I^* - C_I)}{2}$$

$$p = \frac{C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I) + c_{vMi}^*(M, AS_T) \times f - c_{vMi}(M, AS_I) \times f}{2}$$

$$p = \left(\frac{f}{2} \times \Delta c_{vMi} \right) - \frac{C_{FMi}(M, AS_I) - C_{FMi}^*(M, AS_T)}{2}$$

4.2.3.3 Análisis de resultados

La negociación tiene sentido cuando los ahorros en los costes unitarios del tráfico de interconexión superan el diferencial de costes fijos (circuitos) entre ambos escenarios dividido por el caudal del flujo de tráfico.

Volviendo al modelo de sensibilidad a costes de la Figura 3-3, la interconexión directa con el operador internacional estaría justificada cuando la suma de costes fijos para establecerla (internos) y sus costes del tráfico en tránsito (externa) sean menores que los mismos conceptos en la interconexión a través del operador convergente nacional

$$(c_{vMi}(M, AS_I) \times f) + C_{FMi}(M, AS_I) < (c_{vMi}^*(M, AS_T) \times f) + C_{FMi}^*(M, AS_T)$$

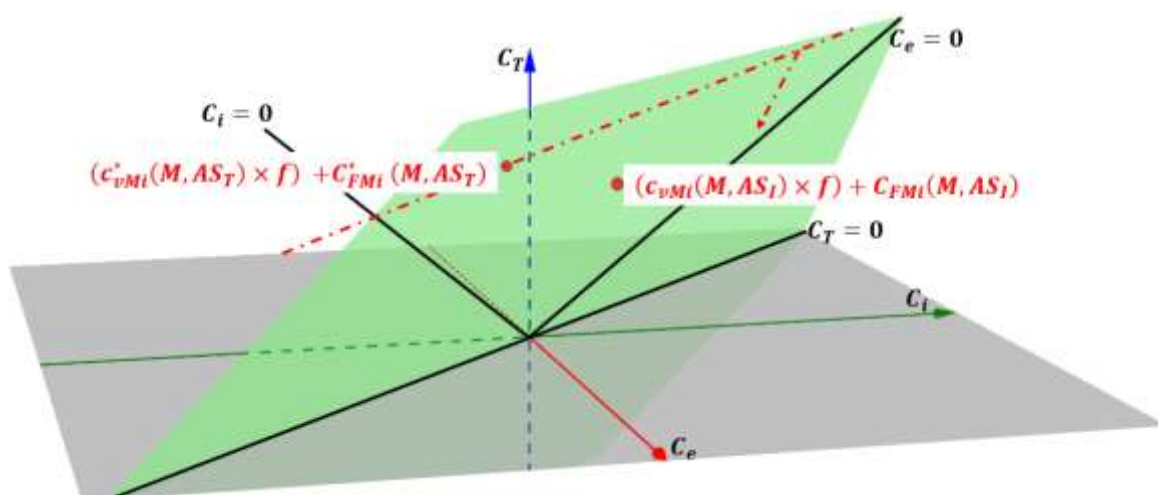


Figura 4-9: Caso de uso 4.2.3: sensibilidad a los costes para obtener excedente (Δ) positivo

El pago será la mitad de los ahorros totales en el coste del tráfico de interconexión minorados con el diferencial de los costes de circuitos.

Las condiciones en las que el pago es positivo no van a implicar que el operador móvil realice efectivamente el pago, “devolviendo” parte de la reducción de tarifas de su tráfico de interconexión. Desde su punto de vista, que es desde donde se ha hecho el análisis, un pago positivo supone, simplemente, mayores incentivos para abordar el cambio.

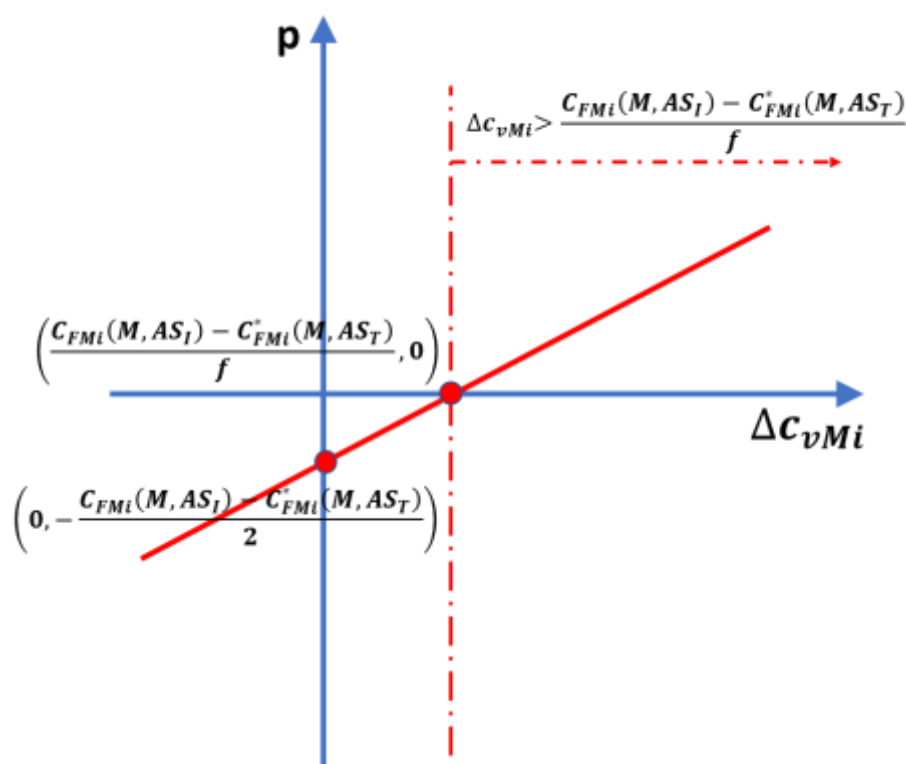


Figura 4-10: Caso de uso 4.2.3: resultado de aplicación de Nash-Peering

Podemos aplicar los resultados obtenidos a una variante del caso de uso en que el operador convergente y el móvil formen parte de una misma unidad económica, y realizar el análisis desde el punto de vista integrado de la misma.

Por una parte, tendríamos que el sobrecoste de la interconexión realizada a través de la red convergente quedaría neteado en las cuentas consolidadas con los ingresos percibidos por ella y

$$\Delta c_{vMi} = c_{vMi}^*(M, AS_T) - c_{vMi}(M, AS_I) = 0$$

ya que el operador móvil habría perdido la ventaja de obtener un coste del tráfico de interconexión a valores marginales sobre el del tráfico del operador convergente (como antes decíamos estos costes responden a tarifas escalonadas con el caudal del tráfico y acumulando un tráfico sobre otro existente se le aplicarían las tarifas marginalmente menores).

Si, además, esta situación implicara la coubicación de los PoPs de los operadores móvil y convergente los costes de circuitos entre ellos serían nulos y

$$C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I) < 0$$

luego

$$\Delta = (C_{FMi}^*(M, AS_T) - C_{FMi}(M, AS_I)) + f \times \Delta c_{vMi} < 0$$

En otras palabras, la negociación no tendría sentido, lo que parece una conclusión evidente, de entrada, en una variante de estas características.

4.2.3.4 Impacto económico de los resultados

En el apartado 4.2.3.2 se concluye que la condición para que la negociación tenga sentido en este caso de uso es

$$\Delta c_{vMi} > \frac{C_{FMi}(M, AS_I) - C_{FMi}^*(M, AS_T)}{f}$$

Como se desprende del análisis realizado, los costes fijos de interconexión de M no dependen del coste de los equipos, puesto que el flujo de tráfico gestionado es el mismo y solo cambia el encaminamiento. Solamente dependen del coste de los circuitos para establecer la interconexión.

Al estar coubicados los PoPs de T y M , el coste de los circuitos entre ellos es nulo.

$$C_{FMi}^*(M, AS_T) = 0$$

Para soportar un ancho de banda de 0,5 Tbps utilizaremos dos pares de fibra oscura locales (≤ 5 Km) iluminada con 2 nodos WDM, uno en cada extremo de las fibras, con conmutación entre los trayectos de fibra para tener recuperación automática de la comunicación en caso de corte.

A partir de los precios y configuraciones del apartado 4.1 obtenemos

$$C_{FMi}(M, AS_I) = (2 \times 5 \times 27) + 2 \times (536,38 + (5 \times 284,38)) = 4.186,56 \text{ €/mes}$$

$$\Delta c_{vMi} > \frac{4.186,56}{500} = 8,37 \text{ €/Gbps/mes}$$

Lo que supone que el diferencial de precios entre encaminar el tráfico directamente a través del operador de tránsito internacional (300 €/Gbps) frente a hacerlo a través del operador convergente debe ser inferior al 2,8% para que el cambio esté justificado para M .

Aunque queda fuera del análisis, T no está fuera del juego totalmente. Desde su punto de vista, para desincentivar que M modifique la interconexión (con efecto negativo sobre sus ingresos), le bastará con mantener el “sobreprecio” que cobra a M sobre sus propios costes de tránsito internacional, por debajo del precio que pueda obtener directamente M , que siempre será mayor que el suyo ya que cursa un tráfico significativamente inferior (<10%; ver datos de referencia en 4.2.3.1 frente a 4.2.2.1).

Y, mientras los crecimientos de tráfico (Figura 2-7) mantengan fuertes diferenciales de volumen y caudal entre los operadores móviles y convergentes, estos podrán seguir desincentivando con cierta facilidad las interconexiones directas de los operadores móviles al tránsito internacional.

4.2.4 Interconexión de una CDN internacional con un operador nacional

4.2.4.1 Descripción del caso de uso

Como ya anticipábamos en el apartado 1.1, la aparición de las Redes de Distribución de Contenidos (CDN, *Content Delivery Networks*) internacionales, un nuevo tipo de jugadores *over the top* (OTT) en Internet que generan fuertes desequilibrios en los flujos de tráfico, son fuentes de frecuentes disputas en la interconexión con los operadores de telecomunicaciones nacionales, que cuentan con los clientes finales de acceso.

Mientras que las CDN persiguen interconectarse a nivel nacional en *free-peering* para minorar sus altos costes de tránsito internacional cuando quieren mantener la calidad del servicio ofrecido a sus clientes finales, los operadores nacionales no tienen incentivos económicos para ello, puesto que implica fuertes inversiones en el escalado de sus redes para transportar el tráfico generado por aquellas con buenas prestaciones.

Suele ser una de las disputas tipo de lo que se ha llamado “actitud dictatorial”: la CDN, en aras de una pretendida neutralidad de la red, se apalanca, incentivándolas, en las demandas de sus clientes finales de los servicios de contenidos, que a su vez lo son del acceso prestado por el operador, para presionar a este a establecer la interconexión en *free-peering*, sin que reciba ninguna contraprestación a cambio.

Analizaremos en este caso de uso dos escenarios en la relación de una de estas CDN*s* internacionales (*N*) con un operador europeo (*T*).

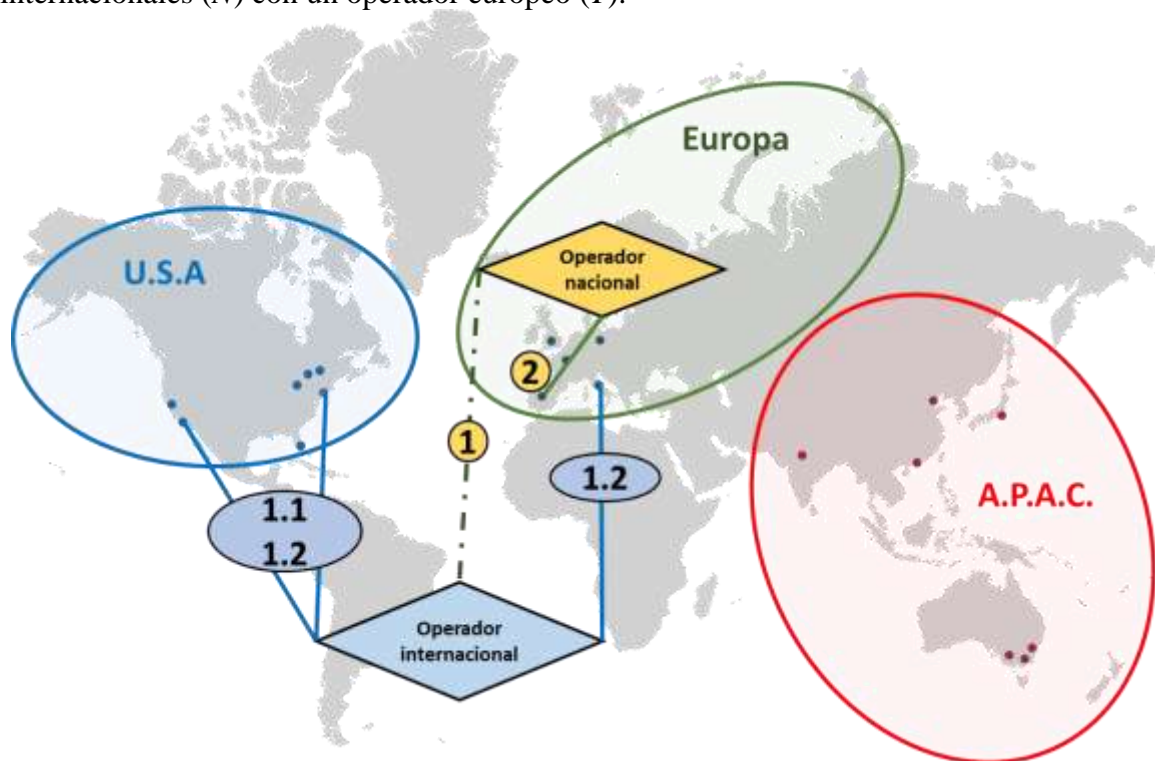


Figura 4-11: Caso de uso 4.2.4: Interconexión de una CDN internacional con un operador nacional

En el primero de ellos (1 en la Figura 4-11), la CDN genera streaming de contenidos en nodos en Estados Unidos y los entrega, en tránsito, a un operador de tráfico internacional (*I*) cuyos PoPs están coubicados con los nodos de la CDN. El operador internacional transporta

esos flujos de tráfico hasta el operador nacional y se los entrega a través de su interconexión internacional. El operador nacional, al no tener ningún incentivo para ello, no realiza ningún esfuerzo inversor adicional para escalar su red ni para ampliar su interconexión internacional, lo que también le sirve para regular el volumen de tráfico que soporta la red en prestaciones óptimas globales.

En el segundo (2 en la Figura 4-11), la CDN despliega sus nodos coubicados con PoPs de interconexión nacional del operador y se establece una relación de *peering* entre ambos, cursando el tráfico con el caudal necesario para obtener las prestaciones que sean precisas en un servicio de calidad al cliente final. Además, el operador nacional invierte en el escalado de toda su red para soportar el fuerte incremento de tráfico que le supone la nueva interconexión.

El objetivo final del análisis es identificar potenciales pagos cruzados entre la CDN y el operador nacional, en base a un modelo Nash-Peering, que justifiquen el establecimiento de la interconexión.

El tráfico intercambiado en *peering* (f) asciende a 2 Tbps, lo que supone un 20% del tráfico total que se cursaría por la red nacional.

Cuando no está establecido el *peering*, el tráfico se recibe con el caudal (f^*) que permitan los excedentes de la interconexión internacional preexistente (750 Gbps), sin provocar saturaciones en el resto de la red y sin hacer crecer la misma para soportar el exceso de caudal (cuando este se produce, se hace *shapping* en la interconexión).

4.2.4.2 Aplicación del modelo

Los costes de las redes en los dos escenarios analizados son

$$C_N^* = C_{FN}^* + C_{VN}^* = (C_{FNb}^* + C_{FNI}^*) + (C_{VNB}^*(f^*) + C_{VNI}^*(f^*))$$

$$C_T^* = C_{FT}^* + C_{VT}^* = (C_{FTb}^* + C_{FTi}^*) + (C_{VTb}^*(f^*) + C_{VTi}^*(f^*))$$

$$C_N = C_{FN} + C_{VN} = (C_{FNb} + C_{FNI}) + (C_{VNB}(f) + C_{VNI}(f))$$

$$C_T = C_{FT} + C_{VT} = (C_{FTb} + C_{FTi}) + (C_{VTb}(f) + C_{VTi}(f))$$

A efectos del análisis, los nodos de la CDN actúan como elementos aislados donde se ubica la totalidad de los contenidos a disposición de los clientes finales. En realidad, mantienen conectividad con servidores centrales (en Estados Unidos) para actualización de contenidos fuera de los horarios pico de demanda y, en algunas situaciones, para acceso a contenidos demandados que no están en los nodos de provisión del servicio, bien porque no ha llegado el momento planificado para descargarlos o bien porque su demanda es muy escasa, con el fin de no ocupar espacio en dichos nodos. Esta conectividad representa un tráfico marginal en comparación con el necesario para la prestación del servicio ($< 5\%$) y no escala con el mismo, por lo que no será tenido en cuenta en el análisis.

De acuerdo con lo anterior, los costes fijos de la CDN se limitan a los relacionados con los nodos de servicio y son los mismos con independencia de dónde se ubiquen estos

$$C_{FNb}^* + C_{FNI}^* = C_{FNb} + C_{FNI}$$

El dimensionado de la CDN se realiza contando con el flujo de tráfico (f) que requiere el escenario más exigente de ambos, el de *peering*, puesto que se persiguen las mejores prestaciones que este ofrece y, por tanto, no hay variación entre escenarios en sus costes variables de *backbone* ni en sus costes de interconexión asociados a puertos y otros

elementos con relación escalonada con el flujo de tráfico, puesto que, desde su punto de vista, el mismo no cambia entre escenarios,

$$\begin{aligned} C_{vNb}^*(f^*) &= C_{vNb}(f) \\ s_{vNi}^* \times f^\alpha &= s_{vNi} \times f^\alpha \end{aligned}$$

En otras palabras, como ya anticipábamos en la descripción del caso de uso, desde el punto de vista de la CDN estamos ante un problema, exclusivamente, de coste del tráfico de interconexión y, por tanto, de sus unitarios.

Así, de cara a la CDN en todos los escenarios trabajaremos con el mismo flujo f , que es al que se aspira para prestar el servicio con calidad y sobre el que se establecerán diferenciales de costes entre los escenarios.

No es el mismo caso desde el punto de vista del operador nacional, para quien el problema es solo de costes globales de toda su red.

Por el alto volumen de tráfico generado por la CDN frente al total del encaminado en su red, se verán afectados tanto los diferenciales de sus costes de *backbone*, como los de interconexión, entre ambos escenarios. Por eso, de cara al operador T , en el escenario 2, trabajaremos con el flujo que realmente recibe, f^* .

Veamos qué valor toma el excedente de la negociación:

$$\begin{aligned} \Delta &= (C_N^* + C_T^*) - (C_N + C_T) = (C_N^* - C_N) + (C_T^* - C_T) \\ \Delta &= [(c_{vNi}^* - c_{vNi}) \times f] + [(C_{FTb}^* + C_{FTi}^*) - (C_{FTb} + C_{FTi})] \\ &\quad + [(C_{vTb}^*(f^*) + C_{vTi}^*(f^*)) - (C_{vTb}(f) + C_{vTi}(f))] \end{aligned}$$

Tal como ya dijimos en el apartado 4.2.2.2, el componente de costes variables de la interconexión $s_{vi}(p) \times f^\alpha$ se linealiza cuando los volúmenes de tráfico son muy altos en comparación con el ancho de banda de los puertos (utilización de muchos puertos, de muy alta capacidad y con un uso, de casi todos los puertos, cercano al 100%)

$$\begin{aligned} s_{vi}(p) \times f^\alpha &= k \times f \\ k &= \frac{\text{coste de un puerto de alta capacidad (€)}}{\text{capacidad del puerto (Mbps)}} \\ C_{vi}(f) &= (c_{vi} + k) \times f \end{aligned}$$

En el caso del operador T solo tendrá impacto este componente de costes en el *peering*, cuando se encamine el nuevo flujo de tráfico f , puesto que cuando hay interconexión internacional no hay crecimientos en los PoPs debidos al nuevo tráfico

$$C_{vTi}^*(f^*) = c_{vTi}^* \times f^*$$

Ya hemos dicho que el operador T , al abordar la interconexión en *peering*, deberá escalar toda su red para gestionar con la calidad adecuada el nuevo gran volumen de tráfico recibido. Esto le supondrá un incremento de sus costes de red, tanto los fijos, como los variables del *backbone* (asociados al incremento del tráfico) y los variables asociados a los elementos de red de la interconexión ($k \times f$).

Como el enfoque por parte del otro actor es puramente de interconexión, agruparemos todos estos incrementos de costes en un único concepto incremental de costes globales de toda la red

$$\begin{aligned} \Delta C_{redT} &= (C_{FTb} + C_{FTi} + C_{vTb}(f) + (k \times f)) - (C_{FTb}^* + C_{FTi}^* + C_{vTb}^*(f^*)) \\ \Delta &= ((c_{vNi}^* - c_{vNi}) \times f) - \Delta C_{redT} + ((c_{vTi}^* \times f^*) - (c_{vTi} \times f)) \end{aligned}$$

Finalmente, para simplificar el análisis, consideraremos que los costes unitarios asociados al tráfico que deban soportar la CDN y el operador tras la interconexión Nash-Peering serán cero. Siendo el objetivo del análisis encontrar el valor cruzado de los pagos entre los dos actores de la interconexión, aunque lo hayamos considerado nulo de entrada, el mismo se derivará precisamente de las conclusiones del análisis.

$$c_{vNi} = c_{vTi} = 0$$

con lo que

$$\Delta = (c_{vNi}^* \times f) - \Delta C_{redT} + (c_{vTi}^* \times f^*)$$

Dado que el excedente ha de ser mayor que cero para que tenga sentido la negociación

$$(c_{vNi}^* \times f) - \Delta C_{redT} + (c_{vTi}^* \times f^*) > 0$$

$$(c_{vNi}^* \times f) + (c_{vTi}^* \times f^*) > \Delta C_{redT}$$

El pago que tendrán que realizarse N y T entre sí

$$p = \frac{(C_N^* - C_N) - (C_T^* - C_T)}{2}$$

$$p = \frac{(c_{vNi}^* \times f - c_{vTi}^* \times f^*) + \Delta C_{redT}}{2}$$

4.2.4.3 Análisis de resultados

La negociación tiene sentido cuando el incremental de costes globales de la red del operador T por establecer la relación de *peering* es menor que la suma de los costes del tráfico de interconexión de la CDN³⁵ y el operador a través del operador internacional.

Aplicando el modelo de sensibilidad a costes de la Figura 3-3, la interconexión directa entre la CDN y el operador nacional estaría justificada cuando la suma de costes fijos y variables para establecerla (internos) fuesen menores que los costes de red en el escenario sin interconexión directa (internos) más los costes del tráfico en tránsito internacional (externos) soportados por ambos actores.

$$\Delta C_{redT} < (c_{vNi}^* \times f) + (c_{vTi}^* \times f^*)$$

$$[C_{FTb} + C_{FTi} + C_{VTb}(f) + (k \times f)] < [(C_{FTb}^* + C_{FTi}^* + C_{VTb}^*(f^*)) + ((c_{vNi}^* \times f) + (c_{vTi}^* \times f^*))]$$

³⁵ Como se ha dicho previamente, en el caso de la CDN se toma en cuenta el flujo final de tráfico (f) para el cálculo de costes de tránsito internacional, pues son en los que realmente se incurriría si el operador nacional no tuviera limitada su interconexión al dimensionado previo a la generación de los nuevos flujos de tráfico.

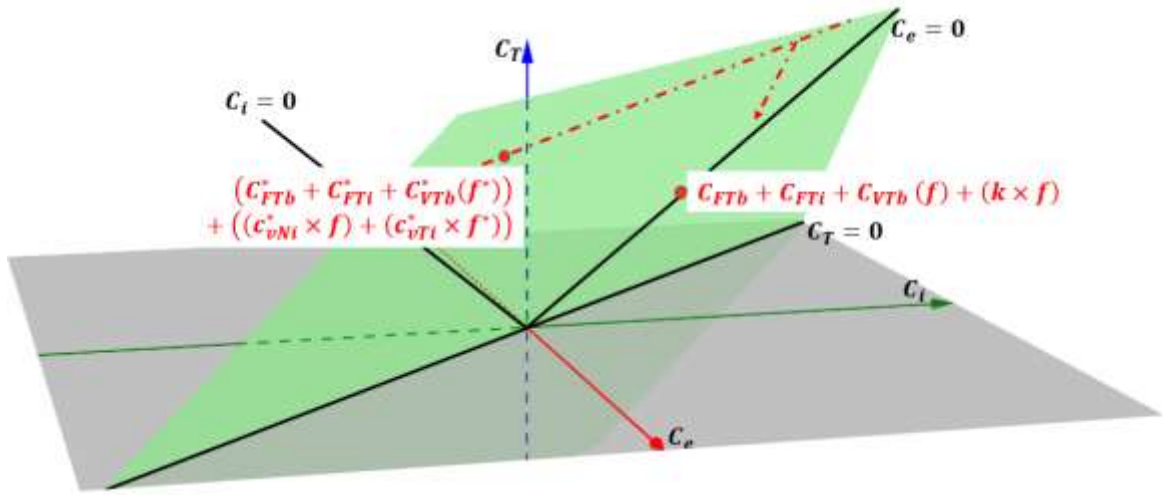


Figura 4-12: Caso de uso 4.2.4: sensibilidad a los costes para obtener excedente (Δ) positivo

El pago sería la mitad del diferencial de costes del tráfico entre CDN y operador cuando está establecida la interconexión internacional más la mitad de los costes de la red derivados de la interconexión directa.

Es razonable suponer que los costes unitarios del tráfico en tránsito internacional son los mismos para ambos actores

$$c_{vNi}^* = c_{vTi}^* = c_{vi}^*$$

$$p = \frac{c_{vi}^* \times (f - f^*) + \Delta C_{redT}}{2}$$

Dado que, por definición, $f > f^*$ y que siempre $\Delta C_{redT} > 0$, precisamente porque $f > f^*$, el pago p siempre será positivo: siempre será la CDN quien deba pagar al operador nacional –de ahí las disputas de que hemos hablado al principio de este caso de uso–.

Por supuesto, como hemos visto en otros casos, el pago no se efectuará como *one-shot*, sino que se traducirá en unos costes unitarios del tráfico que N va a terminar en la red de T , c_{vNi} , a lo largo del tiempo que dure el contrato establecido entre ambos.

$$p = c_{vNi} \times f$$

Esta variable, que antes habíamos igualado a cero para realizar el análisis de forma más sencilla, aparece aquí tomando su valor real en función del pago a realizar entre los actores de la interconexión, tal como se había predicho.

Además, de esta forma, se incorpora en la negociación la variable tiempo, que afecta igualmente a las amortizaciones de los costes de la red (los costes unitarios del tráfico siempre lo son en función del tiempo; €/Gbps/mes).

Si incorporamos esta forma de interpretar el pago a la ecuación que lo define

$$c_{vNi} \times f = \frac{c_{vi}^* \times (f - f^*) + \Delta C_{redT}}{2}$$

$$c_{vNi} = \frac{1}{2} \times \left(c_{vi}^* \times \left(1 - \frac{f^*}{f} \right) + \frac{\Delta C_{redT}}{f} \right)$$

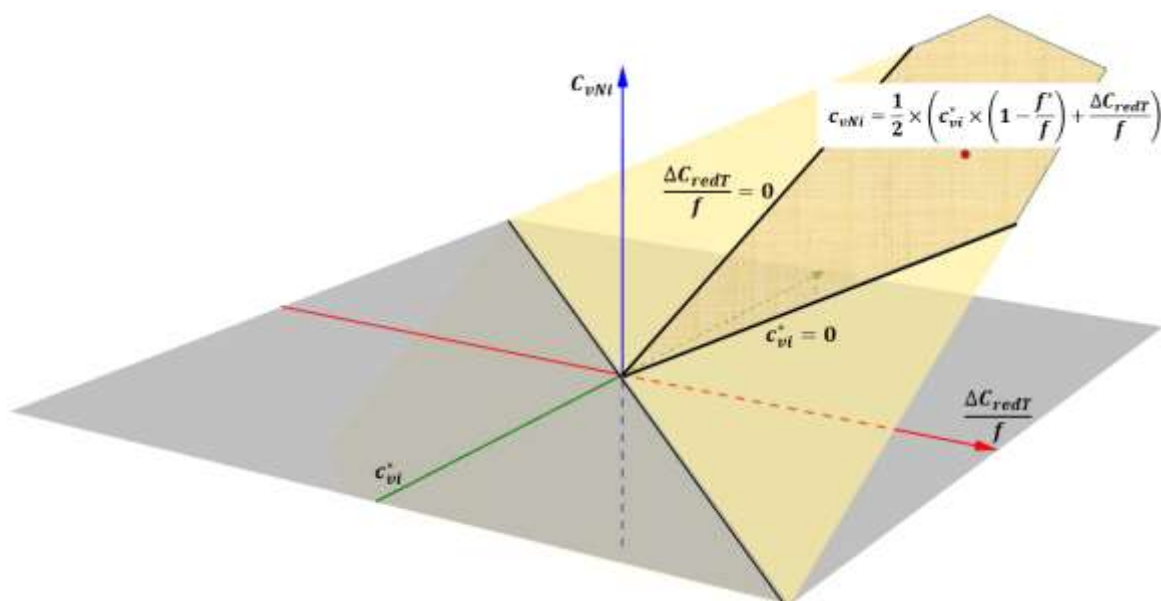


Figura 4-13: Caso de uso 4.2.4: resultado de aplicación de Nash-Peering

Como podemos ver, los costes unitarios del tráfico resultantes (que son siempre positivos por también serlo el pago p del que son trasposición) tienen una dependencia lineal con el incremental de costes de la red (proporcionales al flujo de tráfico cursado) y con los costes unitarios del tráfico en la interconexión internacional.

La sensibilidad a estos últimos, está en función del operador internacional con el que se establece la interconexión. Un operador internacional con amplia presencia (*Tier 1*) proporciona una calidad superior que otro de cobertura más reducida (*Tier 2*), con menos saltos en el transporte del tráfico (menor latencia), lo que favorece la calidad del *streaming* de contenidos y, por tanto, la percepción del consumidor final, pero, por supuesto, también conlleva asociados mayores costes. Sin variar del escenario analizado, en la Figura 4-11 vemos reflejada esta diferencia en los escenarios 1.1 y 1.2, que a efectos del análisis no introducen diferencias, aunque sí lo harán a efectos del cálculo final del valor unitario del tráfico.

4.2.4.4 Impacto económico de los resultados

En primer lugar, para abordar el impacto económico de este caso de uso, hay que considerar las inversiones incrementales en la red IP³⁶ del operador, necesarias para soportar el caudal del nuevo flujo de tráfico, que supone aproximadamente un 75% adicional sobre el crecimiento de tráfico habitual de todo un año. Así, podemos estimar una necesidad puntual adicional de 40 M€, que, con una amortización a 10 años³⁷, supone un impacto de

$$\Delta C_{redT} = 333.333 \text{ €/mes}$$

³⁶ No se imputa el impacto en otras partes de la red del operador, especialmente el acceso, porque tienen una dependencia más relacionada con el ancho de banda ofrecido a los clientes finales que con los caudales medios que efectivamente consumen

³⁷ Aplicando el criterio recogido en la nota al pie nº 13

En el apartado 4.2.4.3 ya se consideró razonable suponer que los costes del tráfico internacional fuesen los mismos para ambos actores

$$c_{vNi}^* = c_{vTi}^* = c_{vi}^*$$

Con lo que la condición para que la interconexión en *peering* sea rentable quedaría como

$$c_{vi}^* \times (f + f^*) > \Delta C_{redT}$$

$$300 \times 2.750 = 825.000 \text{ €/mes} > 333.333 \text{ €/mes}$$

con lo que la condición queda cumplida con holgura.

En el apartado 4.2.4.3 se concluía que el pago p , a realizar por la CDN, debía implementarse como un coste unitario a pagar por la entrega del tráfico en *peering* al operador, y su valor responde a

$$c_{vNi} = \frac{1}{2} \times \left(c_{vi}^* \times \left(1 - \frac{f^*}{f} \right) + \frac{\Delta C_{redT}}{f} \right)$$

$$c_{vNi} = \frac{1}{2} \times \left(300 \times \left(1 - \frac{750}{2000} \right) + \frac{333.333}{2000} \right)$$

$$c_{vNi} = 177,08 \text{ €/Gbps/mes}$$

lo que, en comparación con el coste unitario del tráfico internacional que está pagando la CDN antes de la interconexión en *peering*, 300 €/Gbps/mes, supone una reducción del 41%, lo que, unido a la mejora de la calidad final percibida por sus clientes de los servicios de contenidos, hace razonable el nuevo contexto de relación.

Evidentemente, es un precio que tendrá que ser ajustando con el tiempo, de la misma forma que lo vienen haciendo los costes del tráfico internacional en tránsito en los últimos años (Figura 2-8), y, en combinación con el progresivo incremento de tráfico en Internet debido al consumo de *streaming* de contenidos, deberá seguir compensando en términos absolutos las inversiones realizadas por el operador. En otras palabras, el resultado del análisis no puede ser una foto fija: debe actualizarse periódicamente teniendo en cuenta la evolución de todos los costes involucrados en el escenario analizado.

Situaciones similares a la del caso de uso estudiado, que se han venido planteando en diversas geografías (Netflix con Movistar en España en 2015; Netflix con Vodafone y Comcast en Estados Unidos en 2014; etc.) han llevado a disputas de las que siempre han salido perjudicados los usuarios finales de Internet, al menos hasta que se ha hallado una solución, probablemente temporal, a las mismas.

El camino para buscar esa solución siempre ha estado más centrado en presiones, utilizando a la Administración y a la opinión pública, que en negociaciones efectivas. Esto, con seguridad, predice que los conflictos volverán a aflorar en cuanto las condiciones del tráfico, las redes o la economía evolucionen

Nash-Peering, haciendo un análisis basado exclusivamente en los costes de los actores, podría haber evitado las disputas y propuesto, como hemos visto, una solución que diera satisfacción a CDN y al operador, si no totalmente, sí a ambos de una forma equilibrada. Y, lo que es más importante, establecido un método para seguir ofreciendo soluciones según las condiciones de contorno vayan evolucionando.

5 Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En los casos analizados verificamos que, desde el punto de vista de los costes, del equilibrio entre los costes soportados por cada uno de los actores involucrados en la interconexión, Nash-Peering siempre nos proporciona una vía que facilita la evolución, dando satisfacción, al menos en parte, a los intereses de quienes se interconectan.

Para lograr el equilibrio, la solución de Nash obliga en los distintos escenarios a que exista un “pago” entre los jugadores, que se traduce según el caso, en comparticiones de costes para construir los nuevos entornos de interconexión, en la fijación de costes unitarios del tráfico intercambiado, en base al establecimiento de acuerdos de largo plazo, o, incluso, en un incentivo para una de las partes de cara a abordar un cambio en el modelo de interconexión.

Lo anterior, que es razonable, en la actualidad no siempre es aceptado por las partes, por lo que de la aplicación del modelo Nash-Peering se induce un cambio en el posicionamiento de los actores a la hora de establecer relaciones de cooperación en Internet. Nash-Peering fuerza a encajar dentro de una relación de cooperación, las relaciones de Internet, que son competitivas, además de cooperativas.

Hemos visto que Nash-Peering modela bien los análisis, de forma relativamente sencilla, al menos en comparación con otros modelos, pero, por definición, solo tiene en cuenta los costes o, potencialmente, los diferenciales de ingresos y costes. Además, el acuerdo se establece a partir de una amenaza a los jugadores: ambos conocen el riesgo de no interconectarse si no se establece el equilibrio de costes propuesto.

Pero vemos que la realidad es más compleja. Por un lado, además de los costes, hay otros elementos que intervienen en la toma de decisiones de las partes y que Nash-Peering no considera: la calidad del servicio final, el valor de la información transportada en los flujos de tráfico... y, lo que es más importante, los aspectos estratégicos de las empresas. Por otro lado, el riesgo que representa la amenaza de no interconectarse no siempre es una opción porque, precisamente, hay aspectos valorables que no están contemplados en una amenaza definida solamente en base a los costes. Estas carencias aconsejan explorar otras alternativas que complementen y extiendan Nash-Peering.

A través del análisis de los casos de uso hemos podido confirmar lo que ya anticipábamos en la introducción de esta memoria (apartado 1): la evolución de Internet ha llevado a un incremento paulatino de la complejidad de las relaciones entre los diferentes actores que se interrelacionan en la Red.

Esta complejidad sigue creciendo cada día más con la aparición de nuevos jugadores que, más allá del mero acceso proporcionado por los ISPs, están construyendo modelos de negocio diferenciados, soportados por la misma infraestructura de comunicaciones (evolucionada) que usaban las tipologías de jugadores que interactuaban hace unas décadas. Y no solo son CDNs, que sustituyen las emisiones aéreas de TV por *streaming* en línea, incrementando el valor aportado a sus clientes son servicios como CoD (*Content on Demand*) o *Past TV* (visualización de emisiones pasadas), sino también son todo tipo de servicios OTT (*Over The Top*) que van desde el juego interactivo multijugador *on-line* o las apuestas, hasta el *streaming* de música, la multivideoconferencias, la mensajería o las transacciones financieras. En resumen, multitud de nuevos actores, muy diversos y con

requerimientos técnicos e intereses económicos diferentes a los que las relaciones tecno-económicas en la Red deben dar respuesta.

5.2 Trabajo futuro

Hemos trabajado sobre un nuevo método de negociación de la interconexión que, entre otras cosas, perseguía la sencillez con el fin de facilitar su aplicación.

Pero, con mucha probabilidad, si el entorno es cada vez más complejo, debemos explorar otras formas de negociación que incorporen esa complejidad creciente en su propia dinámica, si bien ofreciendo modelos finales fácilmente aplicables, como el presentado.

Por supuesto, una primera orientación del trabajo futuro debe ser continuista: seguir analizando casos de uso distintos, como pueden ser interconexiones para rutas con destino en zonas remotas, de alto coste por utilizar cables submarinos o accesos por satélite, o rutas con requerimientos especiales, como valores bajos de latencia, para concretar los escenarios de actuación que mejor se adaptan al modelo Nash-Peering y los condicionantes que en cada caso enmarcan la validez de su aplicación.

En esta línea de continuidad, se debe colaborar con la industria para seguir la aplicación del Nash-Peering en sus negociaciones de interconexión, analizar los resultados que vayan obteniendo y seguir profundizando en las ventajas y barreras para su aceptación y extensión.

Empezando a gestionar la complejidad que hemos citado, se debería analizar la extensión del modelo Nash-Peering a entornos multijugador. Es cierto que la mayoría, por no decir la totalidad, de las negociaciones de interconexión actuales se establecen solamente entre dos actores, pero no es menos cierta la importancia que para el funcionamiento de Internet tienen los Puntos Neutros o Puntos de Intercambio Internet (IXP, *Internet Exchange Points*), donde, dentro de un modelo cooperativo o de pago, un número amplio de actores se interconectan e intercambian su tráfico y, aunque las relaciones suelen ser *one-to-one*, es clara la dependencia de la colaboración entre todos ellos (principalmente en los IXPs cooperativos). La evolución de requerimientos dentro de los IXPs y la complejidad de las relaciones entre actores con intereses muy dispares, convierten estos puntos en objetivo de análisis para una negociación colectiva.

Por supuesto que otras líneas de trabajo futuro deben perseguir también la diversificación de los métodos para, tal como decíamos, incorporar la complejidad a la negociación en un entorno cada vez más complejo, y, comparando ventajas, desventajas y resultados con el método Nash-Peering, identificar cuál se adapta mejor a cada situación del entorno real de las redes y servicios de Internet.

Hay algunos modelos que ya empiezan a tener una cierta aproximación académica [34]. Por ejemplo, la aplicación de subastas en tiempo real [33] en las que se tengan en cuenta todas las variables de la negociación, desde los costes de los actores, al igual que en el modelo de Nash, hasta la calidad percibida por los usuarios finales; o la aplicación de un modelo de ofertas alternadas de Rubinstein [35][36], que permita reunir en un mismo proceso de negociación elementos de conflicto y de cooperación, convivientes en el mundo Internet casi desde sus inicios (ver apartado 1.1).

Sean estos u otros, es clara la necesidad de explorar más modelos de interconexión que complementen los tradicionales tránsito y *peering* y que se adapten mejor a las características de unos jugadores en Internet más diversos y complejos que los que colaboraban y competían en el siglo pasado.

Finalmente, habrá que abordar el posible desarrollo de herramientas que permitan utilizar estos nuevos modelos, más elaborados y complejos que Nash-Peering.

Referencias

- [1] H. Balakrishnan, "A graduate course in computer networks", Massachusetts Institute of Technology, 2009
- [2] P. Maillé, B. Tuffin, "Telecommunication Network Economics: From Theory to Applications", Cambridge University Press, 2014
- [3] J. Pérez Martínez, Z. Frías Barroso, "Las reglas del juego en el ecosistema digital", Fundación Telefónica, 2016
- [4] S. Halabi, "Internet Routing Architectures", 2nd Edition, Cisco Press, 2010.
- [5] G. Owen, "Game Theory", 4th Edition, Emerald Group Publishing Limited, 2013
- [6] J. von Neumann, O. Morgenstern, "Theory of Games and Economic Behaviour", Princeton University Press, 1944
- [7] C. Huitema, "Routing in the Internet", 2nd Edition, Prentice Hall, 2000
- [8] "Internet Interconnection - An Internet Society Public Policy Briefing", Internet Society, 2015
- [9] "Internet Interconnections. Proposals For New Interconnection Model Comes Up Short", Internet Society, 2012
- [10] P. Edwards, L. Cheng, G. Kadam, "Border Gateway Protocol Anomaly Detection Using Machine Learning Techniques", SMU Data Science Review, 2019
- [11] B. Casas Méndez, M. G. Fiestras Janeiro, I. García Jurado, J. González Díaz, "Introducción a la Teoría de Juegos", Publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, 2012
- [12] D. Zarchy, A. Dhamdhere, C. Dovrolis and M. Schapira, "Nash-Peering: A new techno-economic framework for internet interconnections," IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Honolulu, HI, pp. 403-408, 2018
- [13] M. Motiwala, A. Dhamdhere, N. Feamster y A. Lakhina, "Towards a Cost Model for Network Traffic", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 42, Number 1, January 2012
- [14] W. Norton, "A Business Case for Peering in 2010", <https://drpeering.net/white-papers/A-Business-Case-For-Peering.php/>
- [15] S. Bafna, A. Pandey, and K. Verma, "Anatomy of Internet Peering Disputes", arXiv preprint arXiv:1409.6526, 2014.
- [16] A. Dhamdhere, C. Dovrolis, and P. Francois, "A Value-based Framework for Internet Peering Agreements". In ITC, 2010.
- [17] C. Courcoubetis, L. Gyarmati, N. Laoutaris, P. Rodriguez, and K. Sdrolis, "Negotiating premium peering prices: A quantitative model with applications", ACM Trans. Internet Technol., 2016.
- [18] J. Pérez Navarro, E. Cerdá Tena, J. L. Jimeno Pastor, "Teoría de Juegos", 2ª Edición, Pearson Prentice Hall, 2013
- [19] P. Álvarez Causelo, S. Hidalgo Gallego, "Apuntes de Teoría de Juegos", Departamento de Economía de la Universidad de Cantabria, 2013
- [20] J.F. Nash Jr., "The Bargaining Problem", Econometrica, Volume 18, pg. 155-162, 1950
- [21] J.F. Nash Jr., "Two-Person Cooperative Games", Econometrica, Volume 21, pg. 128-140, 1953

- [22] G. Rausser, J. Swinnen, P. Zusman, “The Nash Solution to the Bargaining Problem”, Political Power and Economic Policy: Theory, Analysis, and Empirical Applications (pp. 30-49), Cambridge University Press, 2011
- [23] W. Thomson, “Bargaining and the Theory of Cooperative Games: John Nash and beyond, University of Rochester - Center for Economic Research (RCER), RCER Working Papers, 2009
- [24] J. Nash, “Non-Cooperative Games”, Annals of Mathematics, Vol. 54, pp. 286–295, 1951
- [25] J. Bautista, G. López, “Fundamentos de Teoría de Juegos”, Departamento de Organización de Empresas de la Universidad Politécnica de Catalunya – BarcelonaTech, 2015
- [26] A. Lodhi, N. Larson, A. Dhamdhere, C. Dovrolis, K. Claffy, "Using PeeringDB to Understand the Peering Ecosystem", ACM SIGCOMM Computer Communication Review (CCR), vol. 44, no. 2, pp. 21-27, 2014
- [27] C. Dovrolis, “Efficient and Fair Paid Peering”, WIE workshop @ CAIDA, 2018
- [28] A. Lodhi, N. Laoutaris, A. Dhamdhere and C. Dovrolis, "Complexities in Internet Peering: Understanding the “Black” in the “Black Art”," IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Kowloon, 2015, pp. 1778-1786, 2015
- [29] M. B. Weiss, S. Shin, “Internet Interconnection Economic Model and its Analysis: Peering and Settlement”, Netnomics, 6, 43-57, 2004
- [30] “CISCO Visul Network Index: Global IP Traffic Forecast 2018-2022”, 2019
- [31] Z. Frías Barroso, "Análisis prospectivo del despliegue de redes de comunicaciones móviles LTE en nuevas bandas de frecuencia mediante el desarrollo de modelos tecnoeconómicos", ETSIT-UPM, Tesis Doctoral, 2016
- [32] G. Huston, “BGP in 2019. Part 1 – The BGP Table”, www.potaroo.net, 2020
- [33] V. Valancius, N. Feamster, R. Johari, V. Vazirani, “Mint: A market for internet transit”, *Proceedings of the 2008 ACM CoNEXT Conference*, páginas 70:1-70:6, 2008
- [34] T. Hoang-Hai, B. Tuffin, “Inter-domain pricing: challenges and possible approaches”, International Journal of Network Mangement, número 21, páginas 223–246, 2010
- [35] A. Cunyat, “Negociación estratégica y opciones externas”, Departament d’Anàlisi Econòmica de la Universitat de València, 1998
- [36] A. Rubinstein, “Perfect Equilibrium in A Bargaining Model”, *Econometrica*, nº 50 páginas 97-109, 1982
- [37] “Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas de Telefónica de España S.A.U. para operadores de redes públicas de comunicaciones electrónicas”, Telefónica de España, 2018
- [38] “Resolución sobre la modificación del servicio de entrega de señal de la OBA para introducir los circuitos tipo 10 Gigabit Ethernet y revisar la modalidad de fibra oscura”, CNMC, 2018
- [39] “Cisco GPL 2020”, <https://itprice.com/es/cisco-gpl/asr%20line%20cards>, 2020
- [40] L. Luque Cantó, "Desarrollo de un modelo tecno-económico para el despliegue de centros de datos en redes metropolitanas desagregadas", Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 2019

Glosario

Acción	En el contexto de la Teoría de Juegos, una decisión tomada por un jugador
APAC	Asia-Pacífico
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARPA	<i>Advanced Research Projects Agency</i>
ARPANET	<i>Advanced Research Projects Agency Network</i>
AS	<i>Autonomous System</i>
ASN	<i>Autonomous System Number</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
CDN	<i>Content Delivery Network</i>
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia
De-peering	Dejar de intercambiar tráfico a través de una interconexión en <i>peering</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification</i>
eBGP	<i>external BGP</i>
EGP	<i>Exterior gateway Protocol</i>
EID	Eliminación Iterativa Débil; solución de juegos iterativa mediante dominancia débil
EIE	Eliminación Iterativa Estricta; solución de juegos iterativa mediante dominancia estricta
Estrategia	Una acción o un plan de acciones tomado por un jugador
Externalidades	Situación en la que los costes o beneficios de producir o consumir un bien o servicio no se reflejan en su precio de mercado. Son efectos secundarios (buenos o malos) que se producen cuando una persona o una empresa realiza una actividad y no asume todos los costes de la misma, o todos los beneficios que le podría reportar
FTTH	<i>Fiber To The Home</i>
HFC	<i>Hybrid Fiber-Coaxial</i>
iBGP	<i>internal BGP</i>
IGP	<i>Interior Gateway Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IRU	<i>Indefeasible Right of Use</i>
IS-IS	Protocolo <i>Intermediate System to Intermediate System</i>
ISP	<i>Internet Service Provider</i>
Ix	<i>Interconexión</i>
IXP	<i>Internet Exchange Point</i>

Jugador	Uno de los participantes en un juego
NSF	<i>National Science Foundation</i>
NSFNET	<i>National Science Foundation's Network</i>
OLA	<i>Optical Level Amplifier</i>
ORLA	Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas
OSPF	Protocolo <i>Open Shortest Path First</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>
OTT	<i>Over The Top</i> (suministradores de servicio y contenidos)
Pago	Retribución de cada jugador al finalizar un juego
Perfil de estrategias	Conjunto de estrategias, una por cada uno de los participantes en el juego
Peers	Operadores interconectados (vecinos)
Peering	Interconexión directa entre dos operadores, intercambiando el tráfico originado por los propios clientes y finalizado en los de su par y viceversa
PoP	<i>Point of Presence</i> . Punto de la red donde se establece la interconexión, normalmente un <i>router</i> o un <i>switch</i>
Resultado	Cada una de las formas en que puede finalizar un juego, con consecuencias diferentes para los jugadores
RIP	<i>Routing Information Protocol</i>
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-drop Multiplexer</i>
Sf-peering	<i>Settlement free peering</i> o <i>peering</i> gratuito
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
Tránsito	Utilización de la red de un tercero (red de tránsito) para encaminar el tráfico
Utilidad	En el contexto de un juego, mide las preferencias del jugador
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

